BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NOKTA ODAKLI FRESNEL LENS KULLANILAN CPV SİSTEMLERDE İKİNCİL OPTİK ELEMAN KULLANIMININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat KARTAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2020

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NOKTA ODAKLI FRESNEL LENS KULLANILAN CPV SİSTEMLERDE İKİNCİL OPTİK ELEMAN KULLANIMININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat KARTAL
(171080103)
ORCID: 0000-0003-2790-6331

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN

ORCID: 0000-0003-3421-2020

AĞUSTOS 2020

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171080103 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ferhat KARTAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "NOKTA ODAKLI FRESNEL LENS KULLANILAN CPV SİSTEMLERDE İKİNCİL OPTİK ELEMAN KULLANIMININ ETKİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN .....
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Teslim Tarihi : 28 Temmuz 2020
Savunma Tarihi : 24 Ağustos 2020

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ferhat KARTAL

İmzası:

Anneanneme,

ÖNSÖZ

Tez konusunu belirlememde yardımlarını esirgemeyen ve tez çalışmamı gerçekleştirirken bilgi, tecrübe ve tavsiyelerini benimle paylaşan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Osman TURAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansa başlamam konusunda beni teşvik eden, bu yolda beni cesaretlendiren ve yardımlarını esirgemeyen müdürlerime, iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan, sevgilerini ve bana olan güvenlerini her daim hissettiğim anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Ağustos 2020 Ferhat KARTAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **vii**
SEMBOLLER ..... **viii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**
1. GENEL BİLGİLER **1**
1.1 Giriş 1
1.2 Güneş Enerjisi 3
1.3 Fotovoltaik Teknolojisi 6
1.3.1 Atomik yapı 8
1.3.2 Enerji bant diyagramı: Yasak bant enerjisi 9
1.3.3 Elektron – boşluk çiftleri 11
1.3.4 Katkılama: P-N eklemi 13
1.4 Fotovoltaik Hücrede Enerji Dönüşümü 16
1.5 Fotovoltaik Hücre Performans Parametreleri 16
1.6 Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik Sistemler (CPV) 20
1.6.1 Nokta odaklı CPV sistemler 24
1.6.2 Doğrusal odaklı CPV sistemler 25
1.6.3 Helyostat tipi CPV sistemler 26
1.7 Literatür Özeti 27
1.8 Tezin Amacı 32
2. MATERYAL ve YÖNTEM **34**
2.1 Deneysel Çalışma 34
2.2 Deney Ekipmanları 34
2.3 İç Ortam Testleri 39
2.4 Deneysel Ölçümler İçin Tutarlılık Analizi 42
3. BULGULAR ve TARTIŞMA **44**
3.1 Optik Eleman Kullanımının Etkisi 44
3.1.1 Tek optik eleman kullanımının etkisi 44
3.1.2 İkincil optik eleman kullanımının etkisi 47
3.2 Lensler Arasındaki Mesafenin Etkisi 50
3.3 İkincil Optik Elemanın Yoğunlaşma Oranının Etkisi 58
3.4 İkincil Optik Elemanın f Sayısının Etkisi 61
3.5 Varyans Analizi (ANOVA) 63
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER **72**
KAYNAKLAR **74**
ÖZGEÇMİŞ **80**

KISALTMALAR

AM : Hava kütlesi (Air Mass)
BOE : Birincil Optik Eleman
BP : British Petrol
CIGS : Bakır-İndiyum-Galyum-Selenid
CIS : Bakır- İndiyum- Selenür
CPC : Birleşik Parabolik Yoğunlaştırıcı (Compound Parabolic Concentrator)
CPV : Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik (Concentrated Photovoltaics)
CSP : Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Santrali (Concentrated Solar Power)
FF : Doluluk faktörü (Fill Factor)
HCPV : Yüksek Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik
İOE : İkincil Optik Eleman
KOD : Eşit Optik Yörünge Tasarımlı Kaleydoskop (Kaleidoscope with Equal Optical Path Design)
LCPV : Düşük Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik
MJ : Çok Eklemli (Multi Junction)
PMMA : Polimetilmetakrilat
PV : Fotovoltaik
SP : Yansıtıcı Duvarlara Sahip Tepesi Kesik Dört Yüzlü Piramit (Open Truncated Tethahedral Pyramid with Specular Walls)
TEP : Ton Eşdeğer Petrol
TOE : Tek Optik Eleman
UV : Ultraviyole

SEMBOLLER

Al : Alüminyum
C : Yoğunlaşma Oranı
^{o}C : Santigrat Derece
CdTe : Kadmiyum Tellür
CO_2 : Karbondioksit
E_c : İletim Bandı Enerjisi
E_g : Yasak Bant Enerjisi
E_v : Valans Bandı Enerjisi
EJ : Exa Joule
f : Odak Mesafesi / Optik Eleman Çapı
F_L : Odak mesafesi
GaAs : Galyum Arsenit
Ge : Germanyum
H : Hidrojen
He : Helyum
In : Indiyum
I_{SC} : Kısa Devre Akımı
J : Joule
K : Kelvin
km/s : Kilometre/saniye
kW : Kilowatt
L_D : Lensler Arası Mesafe
meV : Mili Elekron-Volt
mΩ : Mili Ohm
MWp : Mega Watt Peak
nm : Nanometre
P_{max} : Maksimum Güç
R_S : Seri Direnç
R_{SH} : Paralel Direnç
Sb : Antimon
Si : Silisyum
T : Sıcaklık
V_{OC} : Açık Devre Gerilimi
W : Watt
α : Varshni Parametresi
$\alpha_{Cronbach}$: Cronbach Alfa Sayısı
β : Varshni Parametresi
µA : Mikro Amper
θ : Zenit Açısı
Ø : Çap
η : Verim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Farklı yarı iletkenlerin yasak bant enerjisi, α ve β değerleri [26]. **11**
Çizelge 2.1: Optik eleman ve karakteristikleri. **35**
Çizelge 2.2: Yoğunlaştırılmış PV hücre teknik özellikleri. **36**
Çizelge 2.3: Piranometre teknik özellikleri. **37**
Çizelge 2.4: Solar modül analizör teknik özellikleri. **39**
Çizelge 2.5: Deney Listesi. **41**
Çizelge 2.6: Deneysel ölçümlerin güvenilirlik analizi verileri. **43**
Çizelge 3.1: Çift optik Elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının optik özellikleri, L_{Dmax} ve P_{max} değerleri. **54**
Çizelge 3.2: ANOVA analizi için seçilen parametre ve seviyeler. **64**
Çizelge 3.3: ANOVA analizi için P_{max} değerleri ve S/N oranları çizelgesi. **66**
Çizelge 3.4: P_{max} için ANOVA analiz çıktıları. **67**
Çizelge 3.5: ANOVA analizi için P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ değerleri ve S/N oranları çizelgesi. **68**
Çizelge 3.6: P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ için ANOVA analiz çıktıları. **69**
Çizelge 3.7: ANOVA analizi için L_D değerleri ve *S/N* oranları çizelgesi. **70**
Çizelge 3.8: L_D için ANOVA analiz çıktıları. **71**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Atmosfer ve deniz seviyesindeki güneş spektrumu [12]. **4**
Şekil 1.2: (a) Pirheliometre, (b) piranometre ve (c) gölgelendirilmiş piranometre. **5**
Şekil 1.3: (a) Vakum tüplü güneş kollektörü, (b) parabolik oluk kollektörü, (c) fotovoltaik güneş paneli ve (d) yoğunlaştırılmış fotovoltaik teknolojisi. **6**
Şekil 1.4: PV düzeneğinin genel şeması ve fotoelektrik etki oluşumu [17]. **7**
Şekil 1.5: (a) Tek kristalli modül, (b) çok kristalli modül, (c) amorf silisyum modül ve (d) CIS modül. **7**
Şekil 1.6: 1997 - 2017 arası PV üretiminin ülkelere göre pay oranı [20]. **8**
Şekil 1.7: Silisyum atomik yapısı [13]. **9**
Şekil 1.8: Silisyuma ait kovalent bağ yapısı [13]. **9**
Şekil 1.9: Enerji bant diyagramının genel gösterimi [23]. **10**
Şekil 1.10: (a) Yalıtkan, (b) iletken ve (c) yarı iletken malzeme bant diyagramı görünümü [25]. **10**
Şekil 1.11: Yasak bant enerjisinin sıcaklık ile değişimi [26]. **11**
Şekil 1.12: Elektron-boşluk çiftinin oluşumu. **12**
Şekil 1.13: Silisyuma ait foton enerjisi – dalga boyu diyagramı [13]. **13**
Şekil 1.14: Silisyumdaki donör atomunun şematik görünümü [31]. **14**
Şekil 1.15: Silisyumdaki akseptör atomunun şematik görünümü [31]. **15**
Şekil 1.16: P-N kavşağında elektron ve boşlukların birikmesi ve yayılmasının gösterimi [29,33]. **15**
Şekil 1.17: Elektron ve boşlukların kutuplara itilmesi [13]. **16**
Şekil 1.18: PV hücresinin gerçek devre şeması. **17**
Şekil 1.19: PV hücresinin akım – gerilim (I-V) eğrisi [36]. **18**
Şekil 1.20: (a) Artan ışınımın ve (b) artan sıcaklığın PV karakteristiğine etkisi [19]. **20**
Şekil 1.21: (a) Lens örneği ve (b) ayna örneği. **20**
Şekil 1.22: Çok eklemli fotovoltaik hücre. **21**
Şekil 1.23: Üç eklemli CPV hücre spektrumu [39]. **21**
Şekil 1.24: Çok eklemli fotovoltaik hücre verimlerinin yıllara göre gelişimi [42]. .. **22**
Şekil 1.25: (a) Geleneksel lens, (b) Fresnel lens ve (c) tekli güneş pilli içeren iki takip eksenli CPV sistemi [40,44]. **23**
Şekil 1.26: (a) Görüntülemeli Fresnel lens ve (b) görüntülemesiz Fresnel lens. **23**
Şekil 1.27: İdeal bir CPV sistem örneği [45]. **24**
Şekil 1.28: (a) Dört yuvalı Fresnel-Köhler tipi yoğunlaştırıcı, (b) Fresnel lensin gerçek görünüşü, (c) dört yuvalı yoğunlaştırıcı ve güneş pili [46]. **24**

Şekil 1.29: Nokta odaklı Fresnel lens kullanılan CPV sistemin şematik görünümü [47]. **25**
Şekil 1.30: Doğrusal odaklı Fresnel lens kullanılan CPV sistemin şematik görünümü [47]. **26**
Şekil 1.31: Helyostat tipi CPV sistemin şematik görünümü [47]. **27**
Şekil 2.1: Deney düzeneği. **34**
Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan Fresnel lensler. **35**
Şekil 2.3: Yoğunlaştırılmış PV hücre. **36**
Şekil 2.4: (a) Tungsten-halojen çubuk lamba ve (b) aydınlatma ünitesi. **36**
Şekil 2.5: Vernier PYR-BTA marka piranometre. **37**
Şekil 2.6: Kontrol ünitesi. **38**
Şekil 2.7: Solar modül analizörü. **39**
Şekil 2.8: Deney düzeneği şematik gösterimi. **40**
Şekil 3.1: Tek optik eleman kullanımının CPV sistem karakteristikleri üzerindeki etkisi: (a) G=500 W/m^2, (b) G=1000 W/m^2. ..... **46**
Şekil 3.2: Çift optik eleman kullanımının CPV sistem karakteristikleri üzerindeki etkisi (G=1000 W/m^2 için). **49**
Şekil 3.3: L_D mesafesinin (a) D12, (b) D14 konfigürasyonları üzerindeki etkisi (G=1000 W/m^2 için). **51**
Şekil 3.4: L_D mesafesinin (a) D25, (b) D27 konfigürasyonları üzerindeki etkisi (G =1000 W/m^2 için). **52**
Şekil 3.5: İkincil optik elemanın yoğunlaşma oranı (C_2) ve *f* sayısı (f_2) ile maksimum gücün elde edildiği L_D mesafesinin değişimi (G=1000 W/m^2). **53**
Şekil 3.6: Tek ve çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonları P_{max} değerleri (G=1000 W/m^2 için). **56**
Şekil 3.7: Birincil optik elemanın *f* sayısına göre çift ve tek optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının güç çıktılarının karşılaştırılması (G=1000 W/m^2 için). **57**
Şekil 3.8: *f1*= 0,9 değerinde yoğunlaşma oranının CPV sistem performansına olan etkisi: (a) *f2*=0,5 ve (b) *f2*=0,7 için. **59**
Şekil 3.9: *f1*=0,7 ve *f2*=0,5 için yoğunlaşma oranının CPV sistem performansına olan etkisi. **60**
Şekil 3.10: Farklı *f2* değerlerinin CPV sistem performansına olan etkisi: (a) *f1*=0,9 ve (b) *f1*=0,7 için. **62**
Şekil 3.11: Optik özelliklerin P_{max} üzerindeki yüzdesel etki oranları. **67**
Şekil 3.12: Optik özelliklerin P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ üzerindeki yüzdesel etki oranları. **69**
Şekil 3.13: Optik özelliklerin L_D üzerindeki yüzdesel etki oranları. **71**

NOKTA ODAKLI FRESNEL LENS KULLANILAN CPV SİSTEMLERDE İKİNCİL OPTİK ELEMAN KULLANIMININ ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, yoğunlaştırıcı optik eleman olarak nokta odaklı Fresnel lens kullanılan çift optik elemanlı CPV sistemlerin performansları, $G = 500$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti altında deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda farklı optik özelliklere sahip Fresnel lens çiftlerinden oluşan tek ve çift optik elemanlı 33 farklı CPV sistem konfigürasyonu göz önüne alınarak, birincil ve ikincil optik eleman yoğunlaşma oranları (C_1, C_2), f sayıları (f_1, f_2) ve lensler arası mesafenin (L_D) CPV sistem performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmıştır. Buna göre, uygun optik özelliklere sahip ikincil Fresnel lens kullanmanın, CPV sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir.

Genel olarak, lensler arası mesafe belirli bir değere ulaşıncaya kadar, L_D artışı ile CPV sistem performansının iyileşmekte olduğu ancak L_D kritik değerin üzerine çıktığında sistem performansının kötüleşmeye başladığı tespit edilmiştir. Bu kritik L_D mesafesinin, f_2 (C_2) sabit tutulduğunda C_2 (f_2) artışı ile azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, düşük f_1 değerine sahip çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemlerin, tek Fresnel lensli sistemler ile yakın seviyelerde güç çıktısı sağladığı gözlenmiş ve CPV sistemlerin ikincil bir Fresnel lens kullanarak performansının iyileştirilmesi isteniyor ise birincil optik eleman için $f_1 > 0{,}5$ olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Son olarak, Fresnel lens çiftlerine ait optik özelliklerin CPV sistem performansı üzerindeki etki oranlarını öngörmek amacıyla, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler kullanılarak, ANOVA yöntemi ile istatistiki analizler gerçekleştirilmiştir. Çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemlerin performansı üzerinde ağırlıklı olarak birincil optik eleman özellikleri C_1 ve f_1'in etkin olduğu, ikincil optik eleman f sayısı f_2'nin ise sistem performansı üzerinde en az etkiye sahip optik parametre olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güneş Enerjisi, CPV Sistem, Fresnel Lens, İkincil Optik Eleman, ANOVA.

THE EFFECT OF USING SECONDARY OPTICAL ELEMENT IN POINT FOCUS FRESNEL LENS BASED CPV SYSTEM

SUMMARY

In this study, the performances of CPV systems with double optical elements using point focus Fresnel lenses were analyzed under different solar radiation intensities ($G = 500$ and $1000\ W/m^2$) experimentally. In this context, the effects of primary and secondary optical elements' concentration ratios (C_1, C_2), f numbers (f_1, f_2) and distance between lenses (L_D) on CPV system performance were investigated in detail by considering several 33 CPV system configurations with single and double optical elements consisting of different Fresnel lens couples which have particular optical specifications. Accordingly, using of secondary Fresnel lenses which have convenient optical specifications enhanced CPV system performances significantly.

In general, till distance between lenses reaches to a certain value, CPV system performance is getting better with the rise of L_D but when coming up the L_D critical value, system performance is starting to get worse. This critical distance of L_D decreases with the rise of C_2 (f_2) by pegging f_2 (C_2). Besides, CPV systems with double Fresnel lens applications which have low f_1 values are considered to get power close to systems with simple Fresnel lenses. And also, if the performance of CPV systems are desired to enhance by using a secondary Fresnel lens, it is resulted that f_1 value must be bigger than 0,5 for primary optical element.

In conclusion, for the purpose of predicting the effect ratios of optical elements belonging to Fresnel lens couples on CPV system performance, statistical analyses were attained via ANOVA method by using the datas as a result of the experimental studies. It is determined that C_1 ve f_1 as primary optical element specifications are mainly effective on CPV system performance with the application of double Fresnel lens, additionally f_2 of secondary optical element's f number is the optical parameter which has the lowest effect on system performance.

Key Words: Solar Energy, CPV System, Fresnel Lens, Secondary Optical Element, ANOVA.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

İnsanoğlu varoluşundan itibaren enerjiye ihtiyaç duymuştur. Barınmadan gıdaya, sanayiden ulaşıma kadar hayati ve konfor sağlayan birçok konuda enerji olmazsa olmazdır. Enerji üretiminde çeşitli kaynaklar kullanılmakla beraber teknolojik yetersizlik, yerel kaynakların kullanım önceliği, politik vb. nedenlerden dolayı doğalgaz, petrol ve kömür gibi fosil kaynaklı yakıtlar enerji elde etmede birincil kaynak olarak kullanılmaktadır. Yapılan tahminlere göre, fosil yakıtların enerji tüketimindeki paylarının 2040 yılına kadar nispeten azalacağı, buna rağmen birincil yakıt olarak kullanılmaya devam edileceği öngörülmektedir [1]. Bu durum, artılarıyla birlikte birtakım olumsuzlukları da beraberinde getirmeyi sürdürecektir.

Fosil yakıt kullanımı sonucu atmosferdeki CO_2 miktarı geçen yüzyıla oranla 1,3 kat artmıştır. Önümüzdeki 50 yıl içerisinde ise bu miktarın 1,4 kat daha artacağı tahmin edilmektedir. İklim bilimciler, CO_2 gazı sebebiyle oluşan sera etkisinin dünyanın ortalama sıcaklığını son yüzyılda yaklaşık 0,7 ℃ artırdığını tespit etmişlerdir. Sıcaklık artışı 1 ℃'ye yükseldiğinde yeryüzündeki iklimde ciddi farklılıklar ortaya çıkabileceği; 3 ℃'lik artışın ise kutup buzullarının erimesine, deniz seviyesinin yükselmesine, göllerin kurumasına ve tarımsal kuraklık gibi telafisi mümkün olmayan doğal felaketlere sebep olabileceği öngörülmektedir [2,3,4]. Bu nedenle günümüz dünyasında enerji, insanoğlu için ihtiyacın da ötesinde çözülmesi gereken en önemli sorunların başında yer almaktadır.

Özellikle fosil yakıt rezervlerinin azalıyor olması, ekonomik ve çevresel faktörler ülkelerin yenilenebilir ve temiz enerji teknolojilerine yönelmesine sebep olmuştur. Bunların başında ise sonsuz enerji kaynağı olan Güneş gelmektedir.

Her saat Güneş'in yaklaşık olarak 21 milyar ton kömüre eşdeğer enerji sağladığı bilinmektedir [5,6]. BP'nin hazırladığı raporda [7], 2018 yılı dünya genelinde fosil yakıt tüketiminin yaklaşık 13.864,9 milyon TEP olduğu belirtilmiştir. Bu değer ise 22 milyar ton kömüre tekabül etmektedir. Dünya enerji tüketiminde ise yaklaşık

% 80'lik oran ile fosil kaynaklar en yüksek paya sahiptir [8]. Buradan da anlaşıldığı üzere günümüz dünya enerji ihtiyacının çok daha fazlası sadece Güneş'ten temin edilebilmektedir.

Güneş enerjisi çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması sebebiyle geleceğin enerji kaynakları arasında önemli bir potansiyele sahiptir. Isıtma-soğutma uygulamaları, aydınlatma, arıtma, sulama, elektrik üretim ve hatta uzay-uydu sistemleri gibi birçok alanda güneş enerjisinden yararlanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanarak doğrudan elektrik üreten fotovoltaik sistemler ise çevreci uygulamaların başında gelmektedir. Ancak güneş enerji yoğunluğunun coğrafi koşullara bağlı olarak mevsimsel değişim göstermesi, bu uygulamalardan elde edilen verimlerin sınırlı düzeylerde kalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden son yıllarda yapılan çalışmalar, fotovoltaik sistem verimlerinin iyileştirilmesine yönelik yeni uygulamaların geliştirilmesi noktasında yoğunlaşmıştır. Bu uygulamalar içerisinde, güneş ışınlarının lens veya ayna gibi optik elemanlar kullanılarak belirli bir hedefe odaklandığı yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemler (CPV) öne çıkmaktadır.

CPV sistemlerin en önemli avantajları; klasik fotovoltaik (PV) sistemlere göre daha yüksek enerji yoğunluğuna, daha yüksek verime sahip olmaları ve aynı zamanda daha az fotovoltaik hücre alanına ihtiyaç duymalarıdır. Ancak CPV sistem performanslarının odaklanma mesafesi, geometrik yoğunlaşma oranı[1], lensin optik verimi, optik yoğunlaşma oranı[2], f sayısı[3] ve güneş ışınım akısı gibi birçok parametreye bağlı olması nedeniyle oldukça karmaşık bir yapıya sahiptirler. Bu yüzden farklı çalışma koşullarındaki CPV sistemlerden en yüksek performansın elde edilmesi için gerekli en uygun tasarım parametrelerinin araştırıldığı optimizasyon çalışmaları oldukça önemlidir.

[1] Geometrik Yoğunlaşma Oranı = Optik Eleman Yüzey Alanı / Fotovoltaik Hücre Yüzey Alanı, olarak tanımlanır ve esas itibari ile optik elemanın yoğunlaşma oranının teorik sınırıdır.
[2] Optik Yoğunlaşma Oranı = Geometrik Yoğunlaşma Oranı × Optik Verim
[3] f sayısı = Odaklanma mesafesi / Optik Eleman Çapı

1.2 Güneş Enerjisi

Güneş, çapı $1{,}39\,x\,10^{9}$ m olan ve yoğun sıcak gazlardan oluşan bir küredir. Dünya'dan yaklaşık olarak $1{,}5\,x\,10^{8}$ km uzaklıkta olan Güneş'in ısıl ışınımı yaklaşık 300.000 km/s ışık hızıyla hareket ederek gezegenimize 8 dakika 20 saniyede ulaşır. Güneş diski 32 derecelik bir açıyla konumlanmıştır. Bu durum özellikle güneşin noktasal kaynak olarak düşünülmediği yoğunlaştırıcı optikler gibi birçok uygulama için önemlidir ve hatta bu küçük açı, kollektörün optik davranışının analizinde göz önünde bulundurulmaktadır [9].

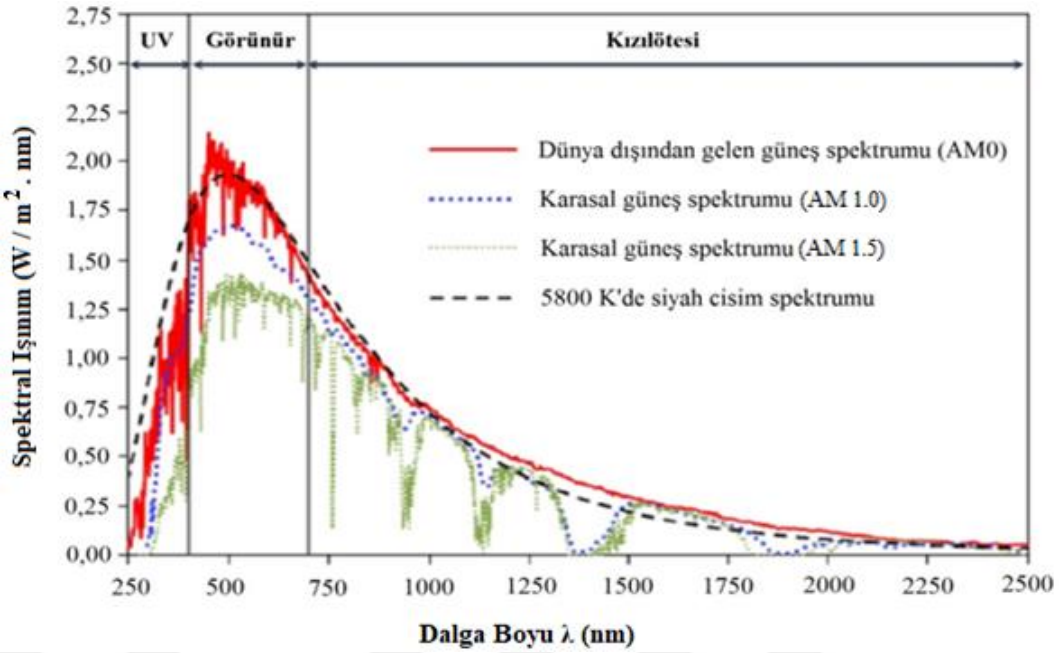
Güneş'in yaydığı enerji $3{,}8\,x\,10^{26}$ W olup, bu enerji Güneş'in çekirdeğinde yaklaşık $1{,}5\,x\,10^{6}$ K derecede Denklem 1.1'de gösterildiği şekilde hidrojenin helyuma termonükleer füzyonundan ortaya çıkmaktadır [10]. Güneş'te her saniyede yaklaşık olarak 564 milyon ton H, 560 milyon ton He'ye dönüşmektedir. Kaybolan 4 milyon ton kütle ise foton olarak uzaya yayılmaktadır.

$$4\,{}_{1}^{1}H \;\rightarrow\; {}_{3}^{4}He + 2\,\beta + enerji\;(26{,}7\;meV) \qquad (1.1)$$

Güneş'in yaydığı enerji dışa doğru tüm yönlerde ışıma yapar. Yayılan toplam ışınımın sadece küçük bir bölümü olan $1{,}7\,x\,10^{14}$ kW'ı Dünya'ya ulaşır ve hatta 84 dakikada yeryüzüne düşen güneş ışınımının Dünya'nın 1 yıllık enerji ihtiyacına (yaklaşık 900 EJ) eşit olduğu tahmin edilmektedir [9].

Güneş'in yaydığı ışınımın spektrumu yaklaşık $5800\;K$ sıcaklığında bulunan bir siyah cismin sahip olduğu spektrum gibidir [11]. Güneş'ten yayılan ışınımlar ise yeryüzüne farklı şiddet ve dalga boylarında ulaşmaktadırlar (Şekil 1.1).

Görünür ışınlar yüksek ışınım enerjisi içermektedir. Dalga boyu ne kadar kısa olursa enerji de o derece yüksek olmaktadır. Ayrıca deniz seviyesinde güneş ışınımın $\%\,95$'ten fazlası görünür ışıklardan oluşmaktadır.



Şekil 1.1: Atmosfer ve deniz seviyesindeki güneş spektrumu [12].

Güneş ışını atmosferden geçerken, bazı ışınlar atmosferdeki çeşitli bileşenler tarafından soğurulur. Bu sebeple ışın yeryüzüne ulaşana kadar spektrum büyük ölçüde kırılır [13].

Güneş ışınımının absorbe edilmesi birçok parametreye bağlıdır. Bunlar arasında en önemlisi ise güneş ışınlarının atmosferi geçerken aldığı yolu tarif eden hava kütlesi (AM)'dir (Denklem 1.2). AM, yaklaşık $\frac{1}{cos\theta}$ olup, bu değer güneş tam tepedeyken en küçüktür. Formüldeki θ, güneşin düşeyle yaptığı açı olan zenit açısını ifade etmektedir [14].

$$AM = \frac{Güneş\ Işınlarının\ Atmosferde\ Aldığı\ Yol}{Güneş\ Işınlarının\ Atmosferde\ Aldığı\ En\ Kısa\ Yol} \quad (1.2)$$

Zenit açısının $\theta = 0°$ ve $\theta = 48°$ değerlerindeki $AM = 1$ ve $AM = 1{,}5$ koşulları, fotovoltaik teknolojisi ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Güneş ışınımının yaklaşık % 17,5'i atmosferden geçerken atmosfer tarafından tutulmakta ve atmosferin ısınmasına sebep olmaktadır. % 35'i ise bulutlar ve yerden yansıyarak uzaya geri dönmektedir. Geri kalan % 47'lik kısım ise yeryüzüne düşerek ısıya dönüşmektedir. Atmosfer dışındaki güneş enerjisinin değeri $1370\ W/m^2$'dir ve bu değere güneş sabiti denmektedir. Fakat bu değer atmosferden dolayı $0 - 1100\ W/m^2$ arasında değişmektedir [15].

Güneş ışınımı direkt ve yaygın güneş ışınımı olarak ikiye ayrılır. Direkt güneş ışınımı, güneşten gelen ışınların herhangi bir yansıma veya soğurulma olmadan doğrudan yeryüzüne düşen ışınımdır. Yaygın güneş ışınımı atmosferde partiküller ve hava molekülleri ile dağılan ve yeryüzüne düşen ışınımdır. Toplam ışınım ise direkt ve yaygın ışınım miktarının toplamına eşittir.

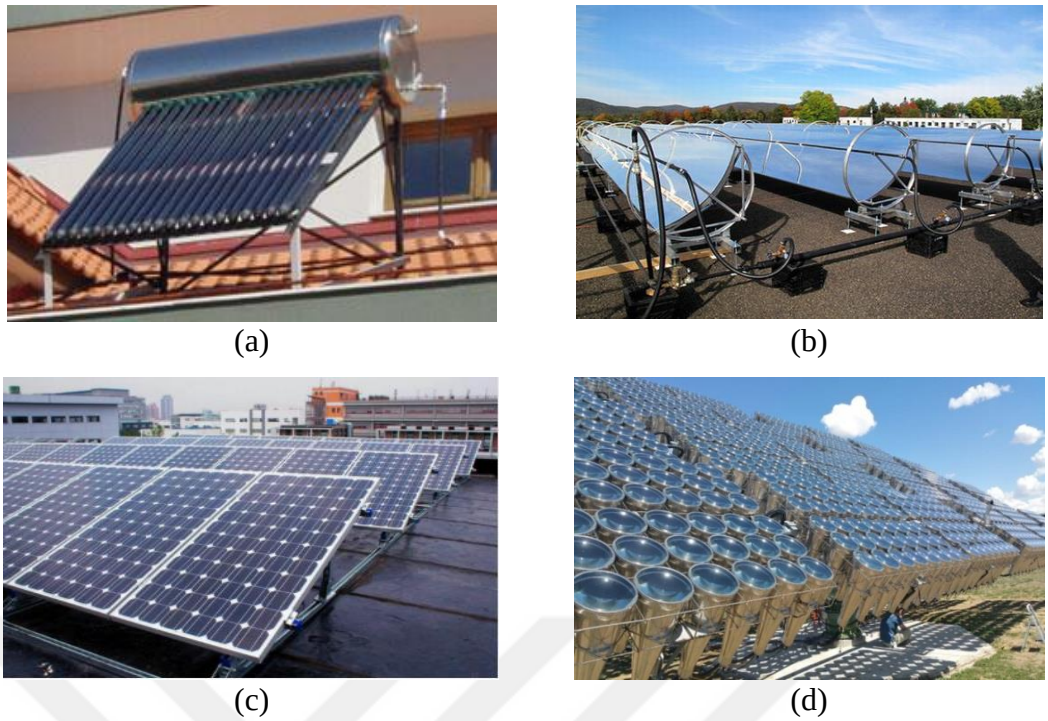
Güneş ışınım değerinin tespitinde 3 ana ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Bunlar direkt ışınım ölçümünde kullanılan pirheliometre, yaygın ışınım ölçümünde kullanılan gölgelendirilmiş piranometre ve toplam ışınım ölçümünde kullanılan piranometredir (Şekil 1.2).



(a) (b) (c)

Şekil 1.2: (a) Pirheliometre, (b) piranometre ve (c) gölgelendirilmiş piranometre.

Güneş enerjisinden birçok alanda istifade edilmektedir (Şekil 1.3). Güneş'in yeryüzüne yaydığı ışınım sonucu ortaya çıkan pasif ısı, bina tasarımı için dikkate alınmaktadır. Daha yaygın olarak kullanılmakta olan güneş termal sistemleri, genellikle su ısıtma uygulamalarında tercih edilmektedir. Elektrik üretim sistemlerinde ise direkt güneş ışınımından elektrik üretilen fotovoltaik teknolojisi (PV) ve güneş ısısından yararlanıp elde edilen buharla elektrik üretilen yoğunlaştırılmış güneş enerji santrali (CSP) öne çıkmaktadır [16].



(a) (b)

(c) (d)

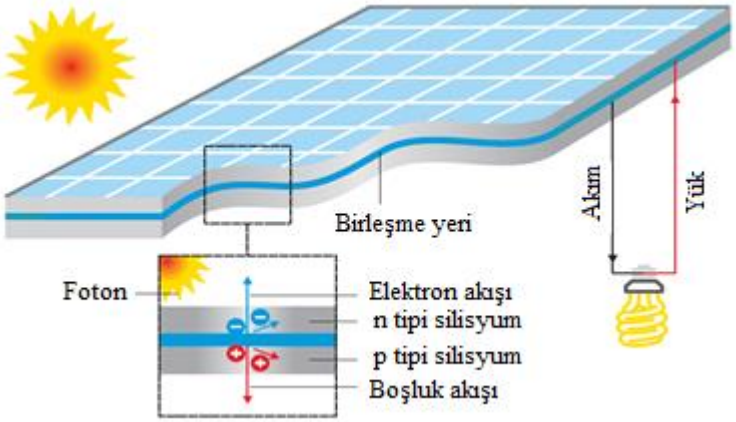
Şekil 1.3: (a) Vakum tüplü güneş kollektörü, (b) parabolik oluk kollektörü, (c) fotovoltaik güneş paneli ve (d) yoğunlaştırılmış fotovoltaik teknolojisi.

1.3 Fotovoltaik Teknolojisi

1839 yılında Fransız Fizikçi Edmond Becquerel, fotovoltaik teknolojinin temeli olan fotoelektrik etkiyi keşfetmiştir. İsviçre Patent Ofisinde yardımcı araştırmacı olarak görev alan Albert Einstein, 1905 yılında fotoelektrik etkiyi tanımlamış ve bu çalışmasıyla 1921 yılında Nobel ödülünü kazanmıştır. Güneş pili ile ilgili ilk patentler 1920'lerde Walter Snelling ve Walter Schottky tarafından alınmıştır. Bell Laboratuvarında görevli Darryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson, 1954 yılında uzak, şebekesiz elektrik sistem örneği olan uydu uygulamalarını güçlendiren silisyumlu güneş pilini keşfetmiştir. 1970'lerin başlarında ise fotovoltaik teknolojisi, Elliot Berman tarafından yeryüzü uygulamalarına uyarlanmıştır. 1986'da ise uzun ömürlü ve verimli olan ince film teknolojisi ortaya çıkmıştır [17].

Fotoelektrik etki, PV hücresinin güneş ışığını elektriğe çevirdiği temel fiziksel işlemdir. Güneş ışığı, güneş enerjisinin foton demetlerinden oluşmaktadır. Bu fotonlar, güneş spektrumunun farklı dalga boylarıyla ilişkide olan çeşitli miktarda enerji içermektedir. Fotonlar PV hücresine düştüğünde bir kısmı yansıtılır, bir kısmı soğurulur, kalanı ise hücrenin ısınmasına sebep olur. Soğurulan fotonlar elektrik

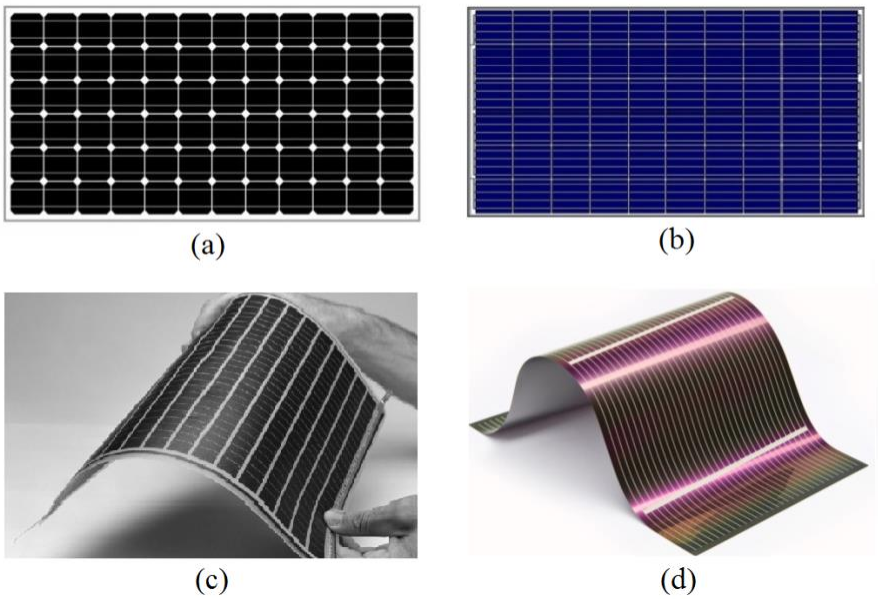
üretirler (Şekil 1.4). Fotonun enerjisi yarı iletken aygıtın atomundaki bir elektrona iletilir. Açığa çıkan enerjiyle, elektron elektrik devresindeki akımın bir parçası olmak için yarı iletkendeki tekli atomla bağ oluşturur ve normal konumundan uzaklaşır [18].



Şekil 1.4: PV düzeneğinin genel şeması ve fotoelektrik etki oluşumu [17].

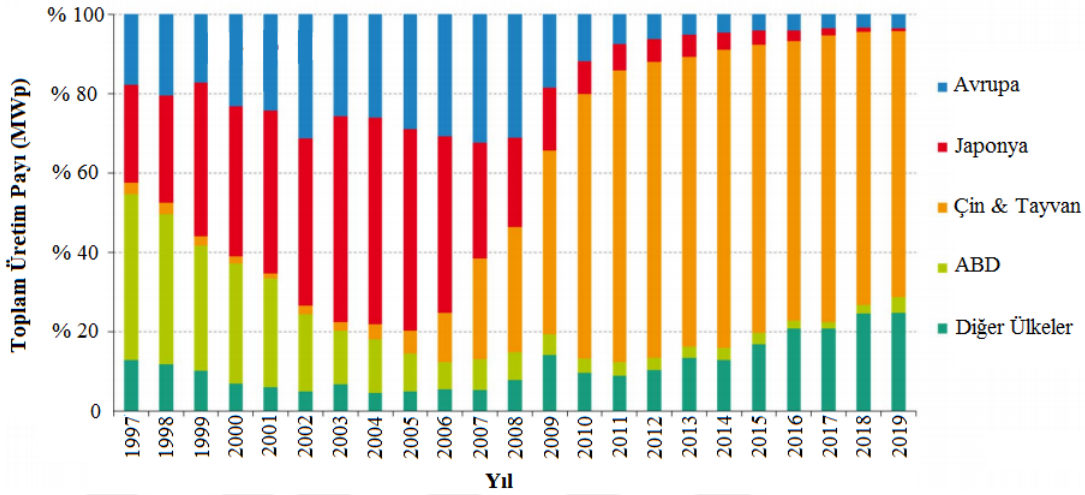
Fotovoltaik ya da güneş hücreleri için çok sayıda farklı yarı iletken malzeme bulunmaktadır (Şekil 1.5). En yaygın malzemeler ise tek kristalli (monokristal) silisyum, çok kristalli (polikristal) silisyum, ince film teknolojisinde kullanılan amorf silisyum ve bakır-indiyüm selenür (CIS)'dür.

Bu teknolojilerin ticari kullanımda verimleri genellikle % 6 ile % 20 arasında olup, güneş ışığından elektrik üretmeye yetkin p-n eklemli diyotlardan oluşmaktadır [19].



Şekil 1.5: (a) Tek kristalli modül, (b) çok kristalli modül, (c) amorf silisyum modül ve (d) CIS modül.

2019 yılı PV modül üretimine ilişkin verilere bakıldığında, Çin ve Tayvan % 66'lık pay ile liderliği ele geçirmiştir. Bunu % 18 ile Asya-Pasifik ve Orta Asya'daki diğer ülkeler takip etmektedir. Avrupa % 3 ve Amerika ise % 4 oranla bu pazara katkıda bulunmuştur (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: 1997 - 2017 arası PV üretiminin ülkelere göre pay oranı [20].

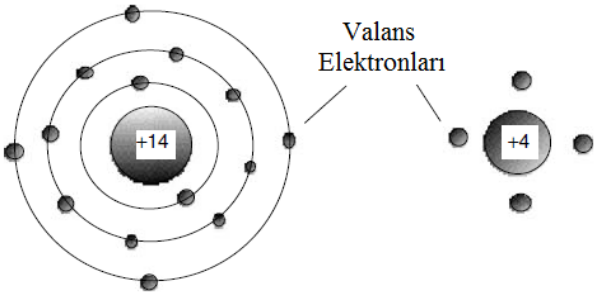
1.3.1 Atomik yapı

Fotovoltaik hücrenin üretiminde kullanılan yarı iletken malzemeler periyodik tablonun 4A grubunda yer almaktadır.

Atomlarda, elektronların çekirdekle olan bağları çekirdekten uzaklaştıkça zayıflamaktadır. Çekirdekle olan bağların zayıf olduğu ve en dış yörüngede bulunan bu elektronlara valans (değerlik) elektronları denmekte olup, bu elektronlar madde yapısını belirlemektedirler. Valans elektronları, ait oldukları enerji düzeyinden daha yüksek seviyelere çıkmadan madde içerisinde serbestçe dolaşabilmektedirler [21]. Valans elektronları atomun en yüksek enerji seviyesine sahip elektronlarıdır. Enerjilerinin yüksek olması valans elektronlarını atomdan ayrılmaya daha eğimli hale getirmektedir.

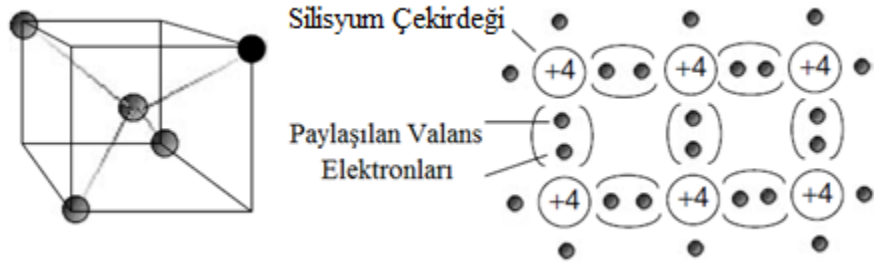
Çok sayıda yarı iletken olmasına rağmen, günümüzde ticari PV hücrelerde kullanılan en popüler seçenek tek kristalli silisyumdur [18].

Silisyum çekirdeğinde 14 proton bulunur ve 14 yörünge elektronuna sahiptir. Dış yörüngede 4 valans elektron bulunmaktadır ve 4 değerliklidir. Bu valans elektronlar elektronikte en önemli atom altı parçacıklardır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7: Silisyum atomik yapısı [13].

Saf kristalli silisyumda, her bir atom 3 boyutlu 4 yüklü desen içerisindeki, 4 komşu atomla kovalent bağ oluşturur (Şekil 1.8).



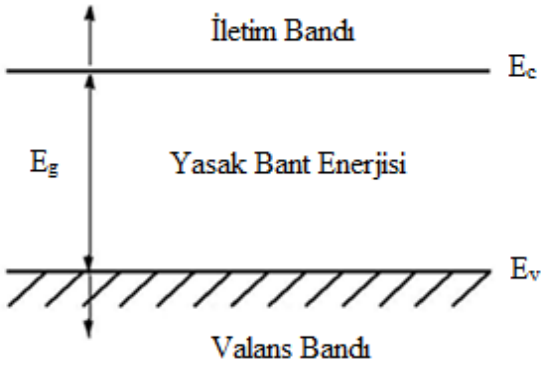
Şekil 1.8: Silisyuma ait kovalent bağ yapısı [13].

1.3.2 Enerji bant diyagramı: Yasak bant enerjisi

Bir atomun elektronları farklı enerji seviyelerine sahiptir. Kristal yapıya yaklaştığında enerji seviyeleri bölünür ve uzay seviyesine yakın bölgelerde atomik etkileşim sebebiyle sürekli enerji bantları meydana gelir [22].

Yalıtkan ve yarı iletkenlerde valans elektonların bulunduğu enerji seviyeleri ile daha yüksek enerjiye sahip iletkenlik seviyesi arasında kalan bölgeye yasak enerji bandı denmektedir. Valans elektronların bulundukları enerji bandına valans veya değerlik bandı, yasak banttan sonra elektronların bulunabileceği ilk enerji seviyesine ise iletkenlik veya iletim bandı denmektedir. Yasak enerji bandının genişliği malzemenin yalıtkan veya yarı iletken olmasını belirlemektedir [21].

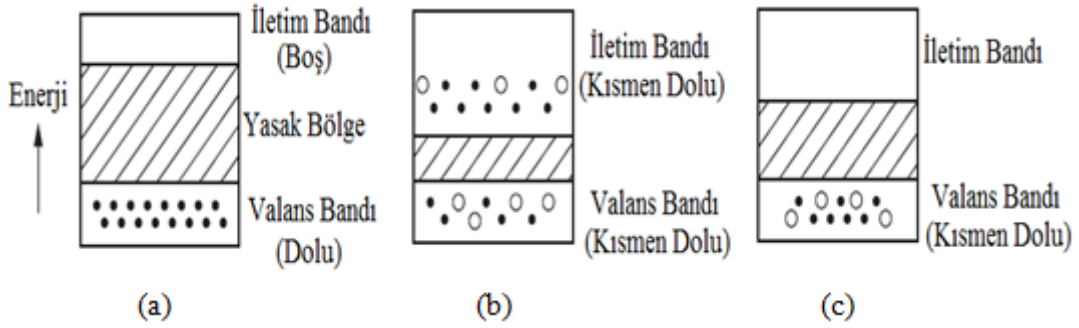
Enerji bant diyagramında; iletim bandının (E_c) en alt, valans bandının (E_v) ise en üst seviyesi gösterilmektedir. Arada kalan boşluk ise yasak bant enerjisi (E_g)'dir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9: Enerji bant diyagramının genel gösterimi [23].

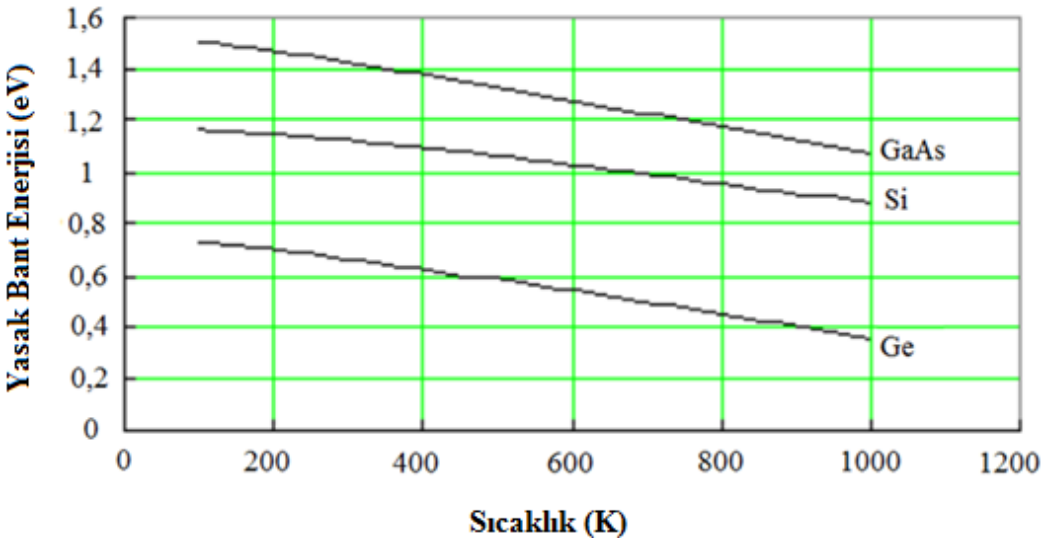
İletim bandı en yüksek enerji seviyesine sahip olan banttır. Bulundukları enerji bandından daha yüksek enerji seviyeli iletim bandına geçerken elektronların sahip olması gereken enerjiye yasak bant enerjisi (E_g) denilmektedir [24].

Valans bandı tamamen dolu olan yalıtkan malzeme çok geniş yasak banda (> 3 eV) sahiptir. Valans bandı nispeten boş olan ve iletim bandında elektronlara sahip olan malzemeler iyi iletkenlerdir. Yarı iletkenlerin ise valans bandı kısmen dolu ve orta seviyede yasak bant genişliğine (≤ 3 eV) sahiptirler (Şekil 1.10).



Şekil 1.10: (a) Yalıtkan, (b) iletken ve (c) yarı iletken malzeme bant diyagramı görünümü [25].

Yarı iletkenlerin yasak bant enerjisi sıcaklık yükselirken düşme eğilimindedirler (Şekil 1.11). Bu davranış, artan termal enerji nedeniyle atomik titreşim genliği arttığından atomlararası boşluğun artması mantığıyla anlaşılabilmektedir ve malzemenin doğrusal genleşme katsayısı ile ölçülür. Artan atomlararası boşluk, malzemedeki elektronların ortalama potansiyelini azaltmakta ayrıca yasak bant enerjisi değerini de düşürmektedir [26].



Şekil 1.11: Yasak bant enerjisinin sıcaklık ile değişimi [26].

Yasak bant enerjisinin (E_g) sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak Denklem 1.3 ifadesi ile saptanmaktadır.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \tag{1.3}$$

T sıcaklığı (K), $E_g(0)$ 0 K'deki yasak bant enerjisini, α ve β Varshni parametrelerini ifade etmektedir. $E_g(0)$ değeri ve deneysel parametreler, Ge, Si ve GaAs için Çizelge 1.1'deki gibidir.

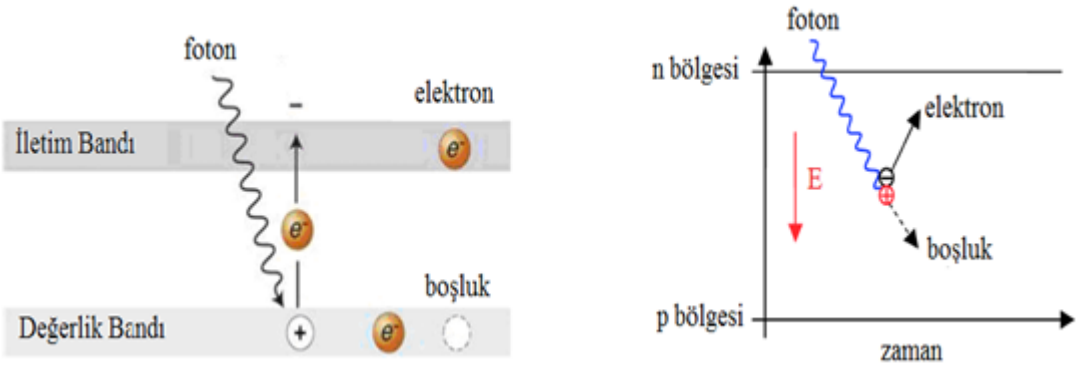
Çizelge 1.1: Farklı yarı iletkenlerin yasak bant enerjisi, α ve β değerleri [26].

	Germanyum (Ge)	**Silisyum (Si)**	**Galyum Arsenit (GaAs)**
$E_g(0)$ (eV)	0,7437	1,166	1,519
α (meV/K)	0,477	0,473	0,541
β (K)	235	636	204

1.3.3 Elektron – boşluk çiftleri

Bir elektron ısı veya ışık enerjisi yardımıyla değerlik bandından iletim bandına geçerken, değerlik yani valans bandında boşluklar oluşacaktır. Bu duruma elektron-boşluk çifti denilmektedir (Şekil 1.12) [27].

Elektron-boşluk çiftleri daha sonra birbirinden ayrılır ve dış yük üzerinden bir akım oluşur. Yüksek enerjiye sahip elektronlar enerjisini dış yüke aktararak fotovoltaik hücreye geri dönerler [28].



Şekil 1.12: Elektron-boşluk çiftinin oluşumu.

Bir fotonun enerjisi Denklem 1.4'teki gibidir.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{1.4}$$

λ fotonun dalga boyunu, ν frekansı, h Planck sabitini ($6{,}625\ x\ 10^{-34}\ J.s$) ve c ise ışık hızını ($3\ x\ 10^{8}\ m/s$) ifade eder.

$1\ eV = 1{,}16\ x\ 10^{-19}$ ve dalga boyu biriminin ise μm olduğu düşünülürse elektron-Volt (eV) cinsinden foton enerjisi $\frac{1{,}24}{\lambda}$ ifadesinden bulunur.

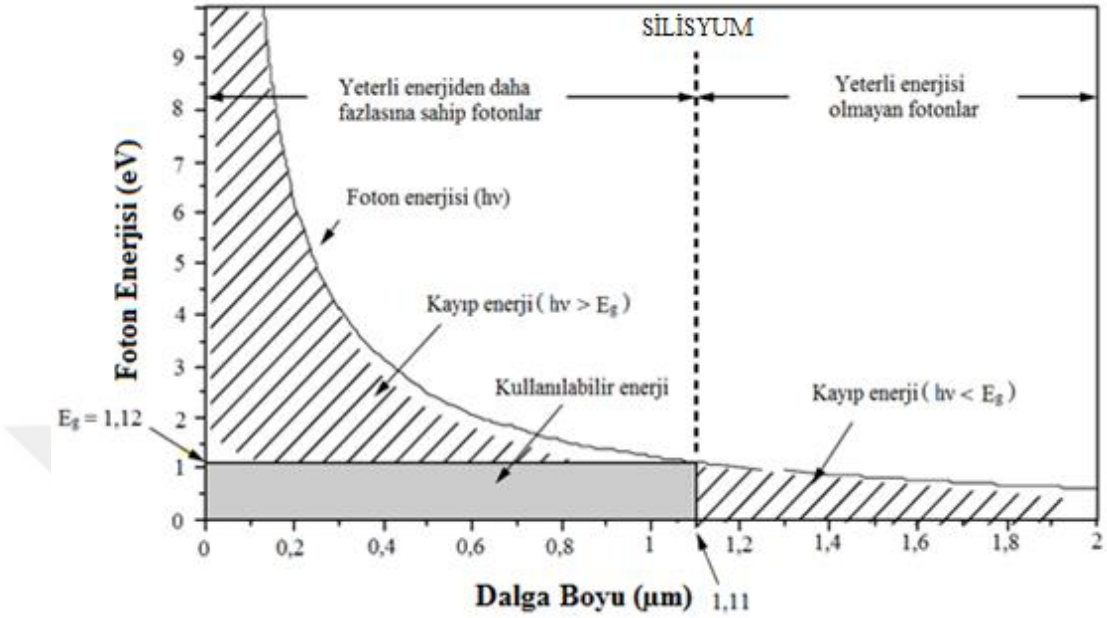
Fotonun enerjisi, p-n eklemli yarı iletken malzemenin yasak bant enerjisine eşit olduğunda veya onu geçtiğinde, elektron-boşluk çifti oluşturmaya yatkın olur [29]. Uyarılan elektron ve boşluklar, enerjilerini $10^{-12}\ s$ gibi çok kısa bir sürede kaybederler. Elektronlar iletim bandının alt, boşluklar da valans bandının üst tarafında birikir. Sonuç olarak yasak bant enerjisine eşit miktarda ışınım enerjisini kaybeden her bir elektron valans bandına dönerek boşluklarla birleşir [24].

Elektronların iletim bandında kaldıkları süreye ömür süresi denilmektedir. İletim bandına atlamış olan elektronlar, ömür süreleri içerisinde boşluklardan (artı yüklerden) ayrılmazlar ise, elektriksel akıma yani fotovoltaik hücredeki enerji dönüşümüne katkısı olmayacaktır.

Yasak bant enerjisinden daha yüksek enerjiye sahip fotonlar soğurulmasına rağmen bir foton sadece 1 elektron-boşluk çifti oluşturabilir. Bu sebeple geri kalan foton enerjisi ısı olarak atılır [29].

Silisyum PV hücresinde, dalga boyu 1,11 μm'den daha büyük fotonlar, elektronu harekete geçirmek için gerekli olan 1,12 eV yasak bant enerjisinden daha az enerjiye sahiptir. Bu fotonların hiçbiri akım taşımaya yetkin elektron-boşluk çifti

oluşturamazlar. Bu sebeple enerjileri sadece PV hücresinin ısınmasına neden olur. Diğer taraftan dalga boyları $1{,}11\ \mu m$'den daha kısa olan fotonlar bir elektronu hareketlendirmek için yeterli miktar enerjiye sahiptirler (Şekil 1.13).



Şekil 1.13: Silisyuma ait foton enerjisi – dalga boyu diyagramı [13].

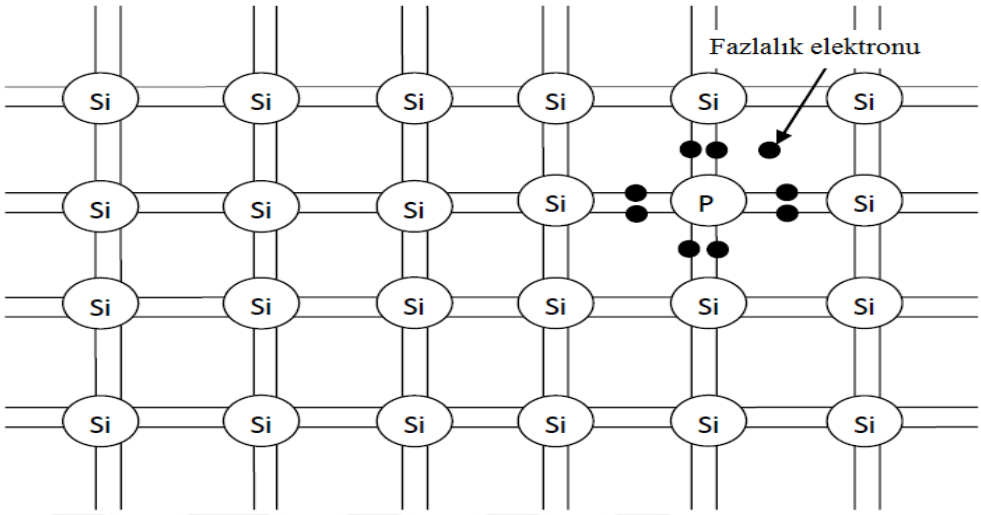
1.3.4 Katkılama: P-N eklemi

Yarı iletkenler, serbest elektron bandı ile iletim bandının arasındaki yasak bant enerjisinin küçük olduğu ($0{,}5\ -\ 1{,}4\ meV$) bir malzeme türüdür. Düşük sıcaklıklarda yarı iletkenler çok sayıda serbest elektrona sahip değillerdir ve yalıtkan davranışı sergilerler. Yasak bandı aşmak, serbest elektron davranışı göstermek ve malzemeye ısı ve elektrik iletim özelliği katmak için elektronların yüksek sıcaklıklarda yeterli termal enerjiye sahip olması gerekmektedir [30].

Yarı iletken malzemenin iletken malzemeye doğru olan bu geçişi, küçük miktarda katkı ($10^{-5}\ -\ 10^{-6}$ yoğunlukta) ekleyerek kolaylaştırılmakta ve bu katkı (impurity) en son yasak bantta müsaade edilen bir enerji seviyesi meydana getirmektedir. Bu işleme katkılama (doping) denmektedir [30]. Katkılama olayı sonucunda n-tipi veya p-tipi madde oluşmaktadır. Elektron veya boşluk sayısının artırılması malzemenin iletkenliğini, azaltılması ise malzemenin direncini artırmaktadır [27].

4'er valans elektronu bulunan saf silisyum atomlarının her biri kararlı bir yapı oluşturmak için komşu atomlarla kovalent bağ oluşturarak elektron alışverişine girerler. 5 valans elektrona sahip bir fosfor (P) atomu, silisyum atomuna

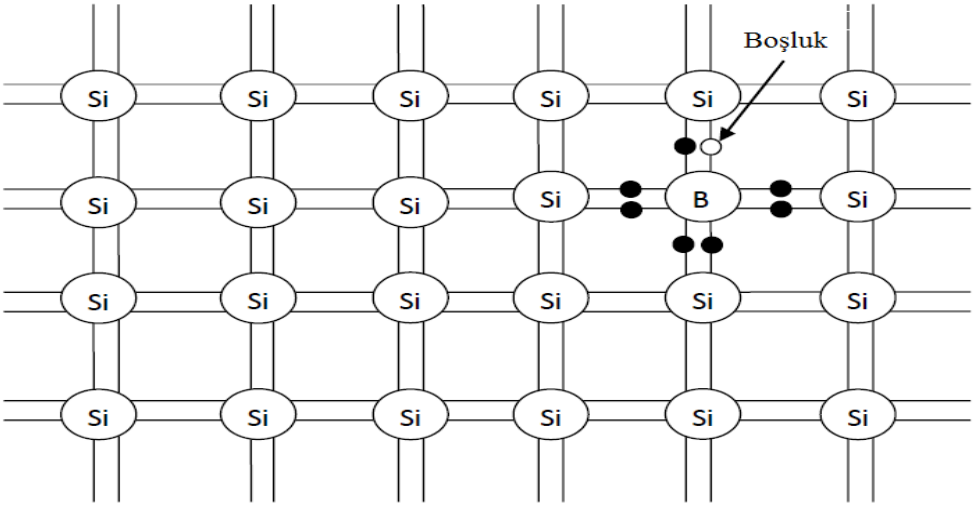
bağlandığında elektrik olarak nötr olmasına rağmen katkılanmış malzeme fazladan elektrona sahip olur ve bu madde n-tipi silisyum olarak adlandırılır. Kristale fazladan elektron bıraktığı için bu atomlara donör (verici) atom adı verilir (Şekil 1.14). P, As ve Sb donör olarak kullanılan elementlerdir [25].



Şekil 1.14: Silisyumdaki donör atomunun şematik görünümü [31].

Diğer taraftan silisyuma 3 valans elektrona sahip bor (B) eklendiğinde katkılanmış malzeme elektriksel olarak nötr olmasına rağmen, yapıda bir pozitif boşluk yani elektron kaybı oluşur. Bu tür yapıya ise p-tipi silisyum denir. Oluşan n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler, yarı iletken içinde elektron ve boşlukların kolay hareket etmesini sağlar. Yarı iletken kristalinden elektron alarak elektron ihtiyacına neden oldukları için bu atomlara akseptör (alıcı) atom adı verilir (Şekil 1.15). Bor elementi, silisyumda en yaygın kullanılan akseptördür. Tercihen In, Ga ve Al da kullanılmaktadır [25].

Katkılamanın amacı aralıklar oluşturup, komşu atomlardan elektron almaya ve bu şekilde devredeki elektron akışının devam etmesini sağlamaktır. Elektron veren atom pozitif yüklenir ve böylece diğer komşu atomdaki valans elektronunu çeker. Bu şekilde zincirleme bir reaksiyon meydana gelir [32].

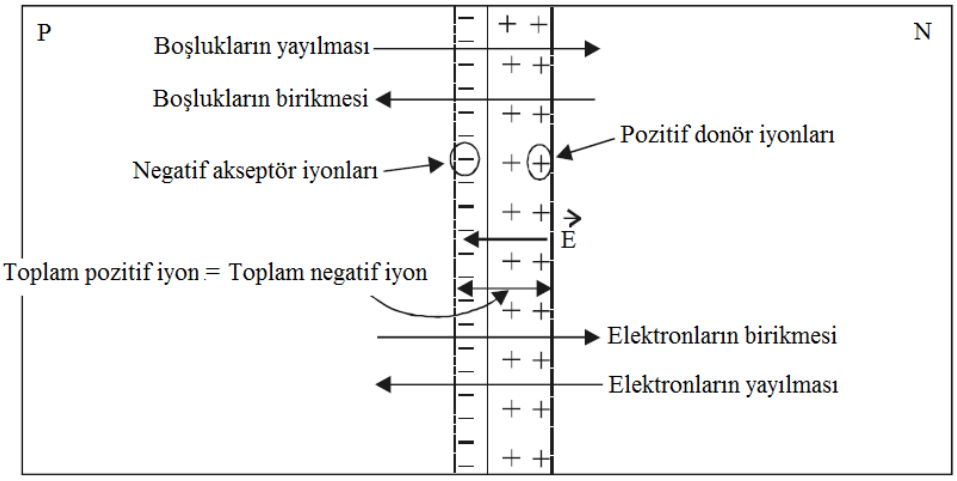


Şekil 1.15: Silisyumdaki akseptör atomunun şematik görünümü [31].

Elektron eksikliği veya boşluk fazlalığı olan p-tipi malzeme ile elektron fazlalığı olan n-tipi malzemenin birleştirildikleri sınıra P-N junction (eklemi) adı verilir. Meydana gelen P-N eklemi bir elektriksel alan oluşmasını sağlar.

Bütün elektron ve boşluklar rastgele bir şekilde dağılmış olarak silisyum kristaline bağlıdır. Bu sebeple her biri yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük olana doğru yayılma eğilimindedirler. Eklemin N ve P tarafı arasındaki boşluk ve elektron konsantrasyonundaki aşırı farklılıklar eklem boyunca geniş gradyanlara yol açmaktadır (Şekil 1.16).

Bu durum N bölgesi içindeki eklem boyunca boşlukların, P bölgesi içindeki eklem boyunca ise elektronların yayılması sonucu oluşmaktadır [29].

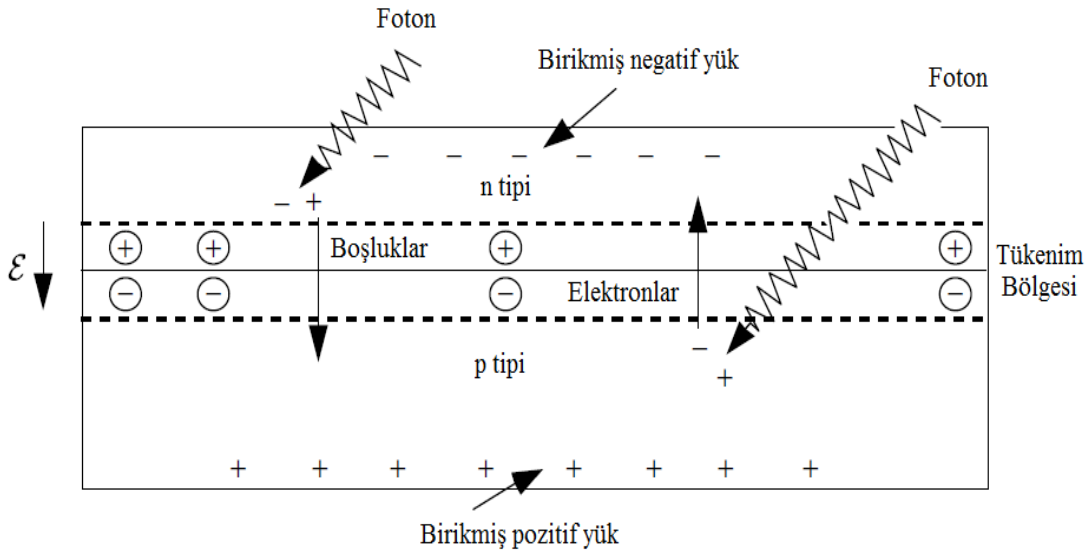


Şekil 1.16: P-N kavşağında elektron ve boşlukların birikmesi ve yayılmasının gösterimi [29,33].

1.4 Fotovoltaik Hücrede Enerji Dönüşümü

Fotovoltaik hücrede enerji dönüşümü iki temel adım içermektedir. İlk olarak ışığın soğurulmasıyla elektron-boşluk çifti oluşur. İkinci olarak da elektron ve boşluklar ayrılarak elektronlar negatif uca, boşluklar ise pozitif uca hareket eder. Bu sayede elektrik gücü üretilmeye başlanır [34].

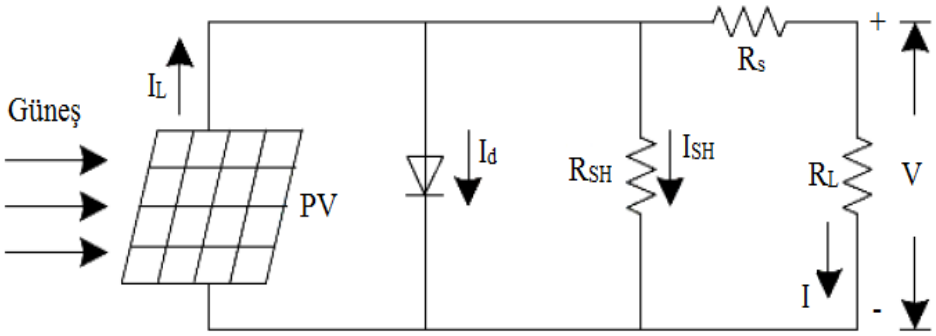
P-N eklem bölgesindeki elektrik alan sebebiyle, hücre üzerine ışık düşmesi sonucu p tipi yarı iletkende iletkenlik bandına çıkan elektronlar, hızlı bir şekilde n tipi bölgeye çekilirler. Benzer şekilde, n tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına atlaması ile değerlik bandında kalan boşluklar boşaltılmış bölgenin kıyısına ulaştıklarında p tipi bölgeye geçerler. Böylelikle fotovoltaik hücre üzerine düşen ışınımlar sonucu elektron ve boşluklar ayrı kutuplara itilmiş olurlar (Şekil 1.17). Bu şekilde birbirlerinden ayrılmış elektronlar ve boşluklar, dış devre üzerinden birleştirildiği zaman, devre elemanlarından akan elektriksel yükler güneş enerjisinden direkt olarak elektrik enerjisi elde etmeyi sağlamaktadırlar [21].



Şekil 1.17: Elektron ve boşlukların kutuplara itilmesi [13].

1.5 Fotovoltaik Hücre Performans Parametreleri

Fotovoltaik hücre parametrelerinin hassas bir şekilde tespit edilebilmesi, PV sistemlerle ilgili dizayn, kalite kontrol ve performans değerlendirmesi açısından çok önemlidir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18: PV hücresinin gerçek devre şeması.

PV hücresinin I-V karakteristiği güneş ışınım yoğunluğu (W/m^2) ve hücre sıcaklığı (℃) ile değişmektedir.

Fotovoltaik bir hücredeki akım-gerilim ilişkisi Denklem 1.5 ve Denklem 1.6'da gösterilmektedir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{AkT}\right) - 1\right] - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (1.5)$$

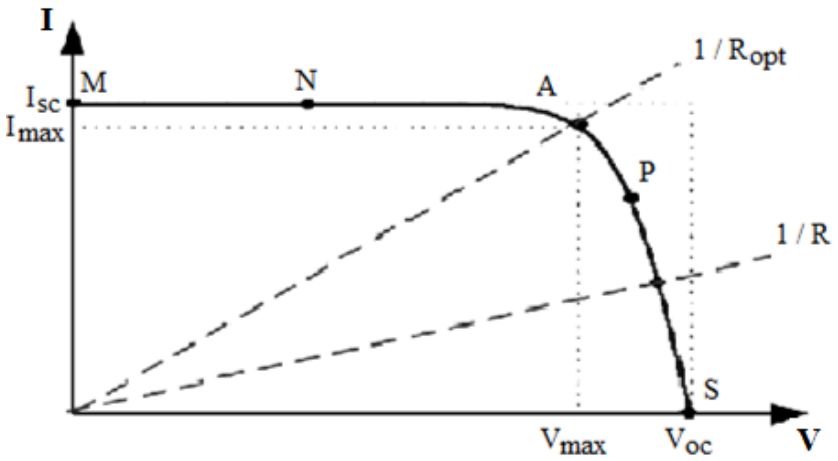
$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{AkT}\right) - 1\right] \quad (1.6)$$

I_d diyotun bağlantı akımını, I yük akımını, I_L fotovoltaik akımı, I_0 ters doyma akımını, q elektron yükünü, k Boltzman sabitini, T mutlak sıcaklığı, A diyot nicelik faktörünü, R_s seri direnci, R_{SH} paralel direnci ifade etmektedir [35].

Yüke aktarılan güç sadece direnç değerine bağlıdır. Bazı durumlarda, R yükü çok küçük olursa, PV hücresi I-V eğrisinin M-N bölgesinde çalışır ve hücre, kısa devre akımına hemen hemen denk olan sabit akım kaynağı gibi davranış gösterir.

Fakat, R yükü büyük olduğunda ise PV hücresi eğrinin P-S bölgesinde çalışır ve PV hücresi açık akım voltajına yaklaşık denk olan sabit bir gerilim kaynağı gibi hareket eder (Şekil 1.19).

PV hücresinin performansını karakterize eden ana parametreler; maksimum güç, kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve doluluk faktörüdür. Enerji dönüşüm verimi de bu parametrelerden yola çıkarak saptanabilmektedir.



Şekil 1.19: PV hücresinin akım – gerilim (I-V) eğrisi [36].

Standart Test Koşulları: I-V karakteristiğinin güvenilir bir ölçümü için, standart test koşulları altında ölçüm yapmak hayati önem taşır. Bu, toplam güneş pili üzerindeki toplam ışın saçılımının $1000\ W\ /m^2$'ye eşit olması gerektiği anlamına gelir. Bir başka deyişle spektrumu $AM\ 1{,}5$'taki spektruma benzemektedir. Pilin performansı sıcaklığa doğrudan bağlı olduğu için güneş pilinin sıcaklığı $25\ ℃$'de sabitlenmelidir.

Şekil 1.19'da I-V eğrisindeki I_{max} ve V_{max}'ın oluşturduğu dikdörtgensel alan ideal güneş pilinde maksimum gücü (P_{max}) vermektedir (Denklem 1.7).

$$P_{max} = I_{max}\ x\ V_{max} \tag{1.7}$$

P_{max} maksimum gücü, I_{max} maksimum akımı, V_{max} maksimum gerilimi ifade etmektedir.

Kısa Devre Akımı (I_{SC}): Güneş pilinin elektrotları kısa devre edildiğinde devreden geçen akıma, kısa devre akımı denmektedir. Güneş pilinin kısa devre akımı, gelen ışığın spektrumundan saptanan güneş pili üzerindeki fotonun geliş akısına bağlıdır. Standart güneş pili ölçümlerinde, spektrum $AM\ 1{,}5$ olarak hesaba katılmıştır. Kısa devre akımı güneş pilinin alanına da bağlıdır.

Açık Devre Gerilimi (V_{OC}): Açık devre gerilimi, devreden akım geçmediğinde oluşan gerilimdir. Bu değer güneş pilinin aktaracağı maksimum gerilimdir. V_{OC}, karanlık akım yoğunluğunun fotoakım yoğunluğunu dengelediği ileri gerilimle ilişkilidir [37].

Doluluk Faktörü (FF): Gerçek güneş pili maksimum gücünün ideal güneş pili maksimum gücüne oranıdır. Zamanla PV eğrisi aşağı doğru iner. Bu sebeple belli aralıklarla hücre niteliğinin kontrol edilmesi gerekir. Hücre niteliği ise doluluk faktörüyle saptanır. İyi bir panel için bu oran $0{,}7 - 0{,}8$ arasında olmalıdır [14].

Doluluk faktörünün ifadesi Denklem 1.8'de gösterilmiştir.

$$FF = \frac{I_{MPP} x\, V_{MPP}}{I_{SC} x\, V_{OC}} \pi r^2 \tag{1.8}$$

I_{MPP} maksimum güç esnasındaki akımı, V_{MPP} maksimum güç esnasındaki gerilimi, I_{SC} kısa devre akımını, V_{OC} açık devre gerilimini ifade etmektedir [32].

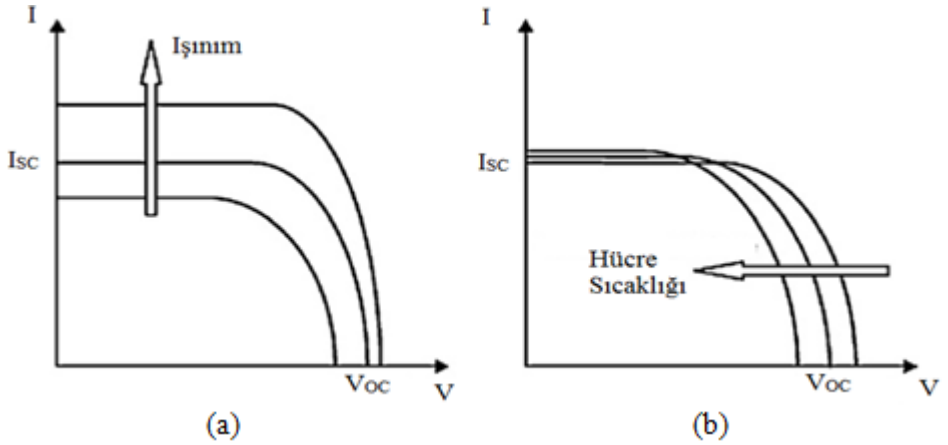
Seri direnç, fotovoltaik hücrenin I-V eğrisi üzerinde, açık devre gerilimi ile maksimum güç noktası arasında kalan bölgenin karakteristiğini etkileyen bir hücre parametresidir. Seri direncin değeri çok küçüktür (yaklaşık $10\, m\Omega$) ve hesaplamalarda ihmal edilebilir.

Paralel (Şönt) direnç ise bir fotovoltaik hücrenin I-V eğrisi üzerinde, kısa devre akımı ile maksimum güç noktası arasındaki bölgenin karakteristiğini etkileyen bir hücre parametresidir. Fotovoltaik hücrenin paralel direnci R_{SH}, fotovoltaik hücrenin kutupları arasındaki sızıntı akımları sonucu oluşur.

Doluluk faktörü, hücrelerin seri ve paralel direnç değerlerinden ve diyot kayıplarından doğrudan etkilenmektedir. Paralel direnç (R_{SH}) artırılarak ve seri direnç (R_S) azaltılarak, doluluk faktörü yükseltilebilir. Böylece hücre çıkış gücü en yüksek değere getirilerek daha yüksek verim elde edilir [28].

Verim (η): Hücreden çıkan enerjinin güneşten gelen enerjiye oranı olarak ifade edilmektedir. Yarı iletken güneş hücrelerinin verimi; laboratuvar ortamında $\%\, 10 - 30$, uygulamada ise $\%\, 5 - 20$ arasında değişmektedir. Uygulamalarda $\%\, 15$'lik verim güneş hücresi için iyi olarak değerlendirilmektedir [28].

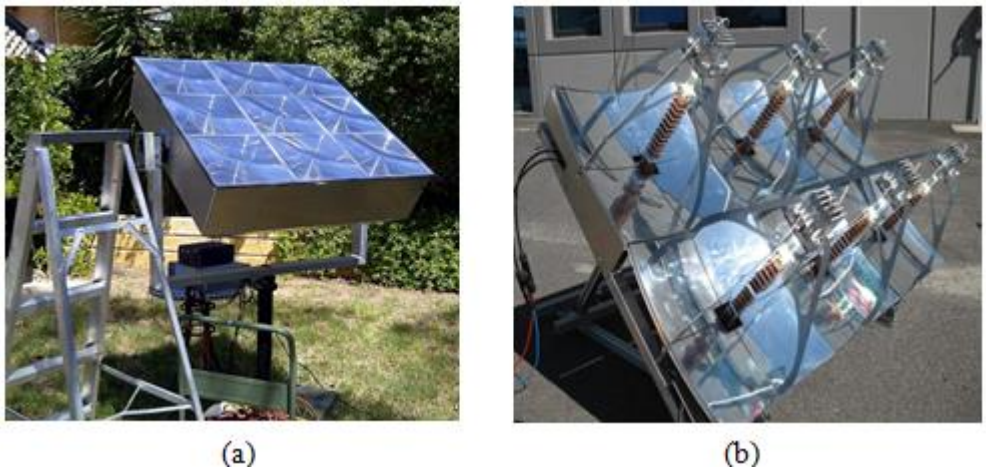
Şekil 1.20a'da açık devre gerilimi güneş radyasyonunun artmasıyla logaritmik olarak artmasına rağmen, kısa devre akımı doğrusal olarak düşmektedir. Şekil 1.20b'de hücre sıcaklığının artmasının ana sebebi hücre sıcaklığıyla birlikte düşen açık devre gerilimidir. Bu yüzden verim de düşmektedir. Grafikten görüldüğü üzere hücre sıcaklığının artışıyla kısa devre akımı da artış göstermektedir.



Şekil 1.20: (a) Artan ışınımın ve (b) artan sıcaklığın PV karakteristiğine etkisi [19].

1.6 Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik Sistemler (CPV)

PV sistemlerin verimliliğini artırmak için lens, ayna gibi ucuz yansıtıcı malzemeler kullanılarak güneş ışığı, küçük ve yüksek verimli fotovoltaik hücrelerin üzerine yoğunlaştırılır. Bu yönteme yoğunlaştırılmış fotovoltaik denmektedir (Şekil 1.21) [9].



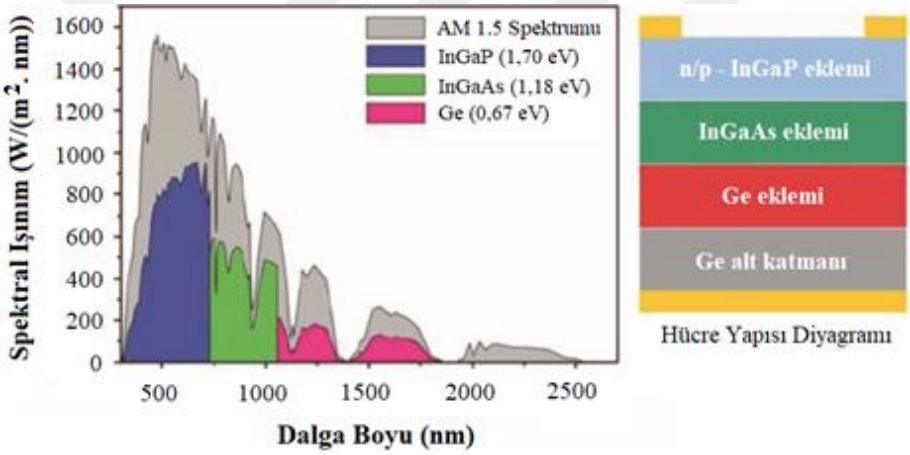
Şekil 1.21: (a) Lens örneği ve (b) ayna örneği.

Yoğunlaştırılmış fotovoltaiklerde güneş pilinin önüne, ışığın yoğunluğunu belli faktörde artıran bir yoğunlaştırıcı yerleştirilir. Bu yoğunlaştırma faktörü 100'den az ise düşük yoğunlaştırmalı fotovoltaik (LCPV), 300'den fazla ise de yüksek yoğunlaştırmalı fotovoltaik (HCPV) denmektedir. Günümüzde LCPV sistemlerinde çoğunlukla silisyum bazlı ve hatta CIGS hücreler kullanılmaktadır [38]. Diğer taraftan HCPV sistemlerde ise çok eklemli hücreler kullanılmaktadır. Şekil 1.22'de çok eklemli güneş piline ait örnek yer almaktadır. Çok eklemli güneş pilleri farklı

yasak bant enerjisine sahip InGaP, InGaAs, Ge gibi hücreler içermekte ve silisyum, CdTe, CIGS vb.'den imal edilmiş geleneksel güneş pillerine nazaran güneş spektrumundan daha iyi faydalanmaktadırlar (Şekil 1.23).



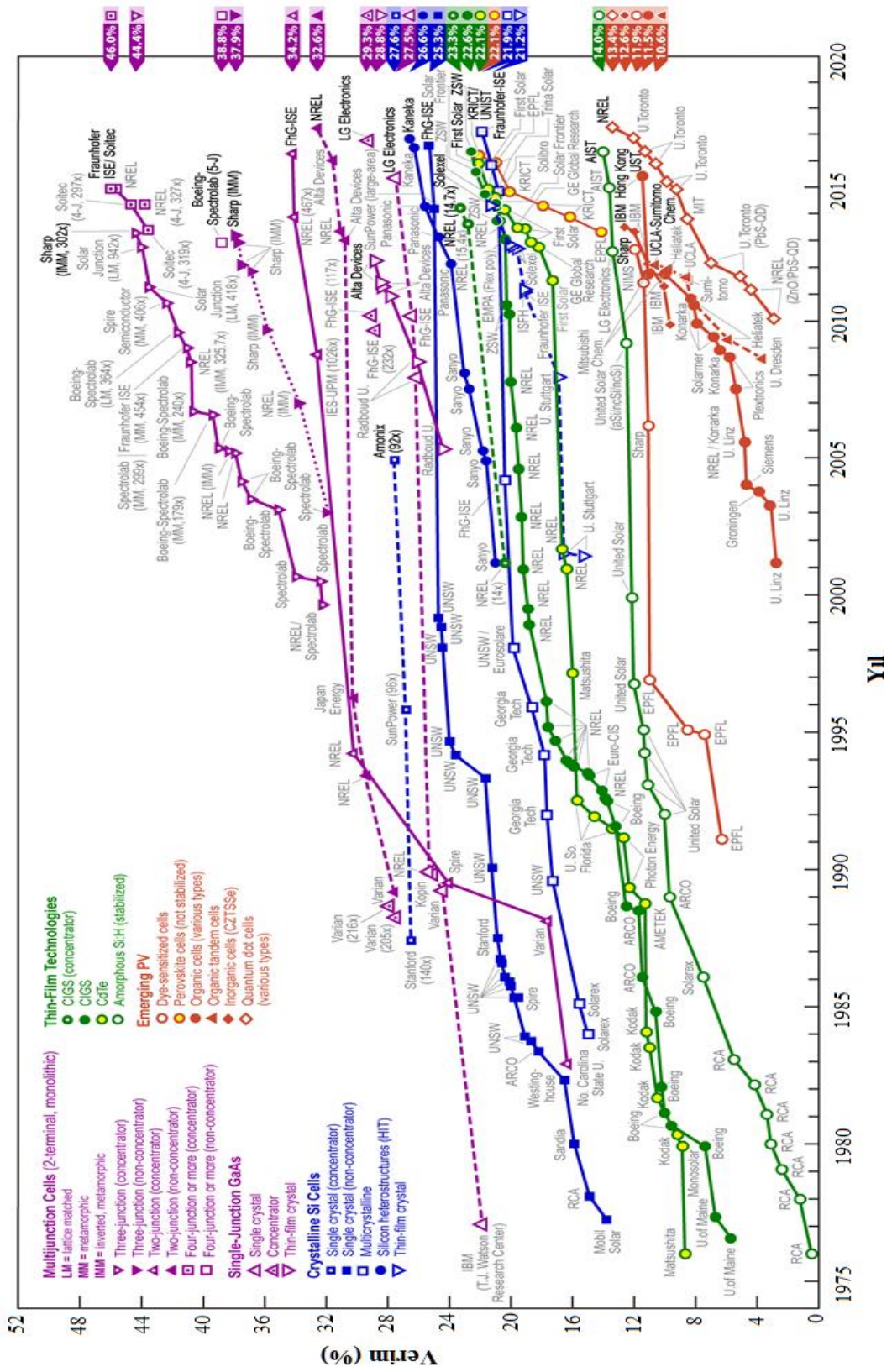
Şekil 1.22: Çok eklemli fotovoltaik hücre.



Şekil 1.23: Üç eklemli CPV hücre spektrumu [39].

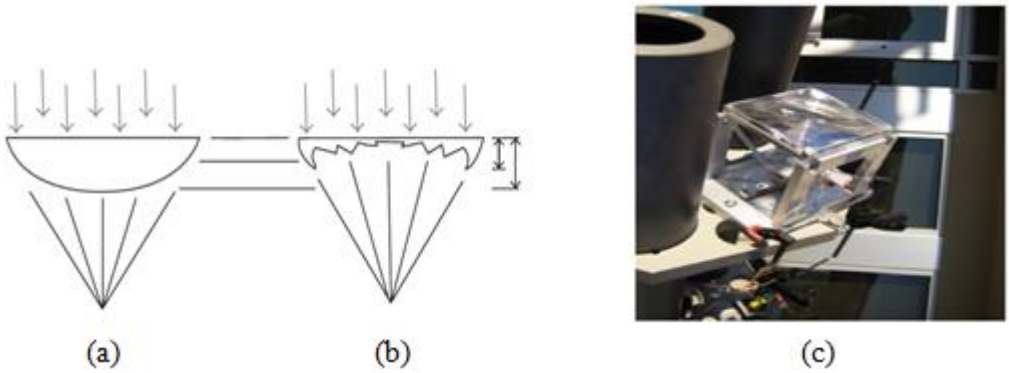
Şekil 1.24'te farklı PV hücre teknolojilerinin yıllara göre verim değişimleri yer almaktadır. Günümüzde farklı türde güneş pilleri kullanılmakta olup, en yaygın kullanılanlar arasında olan üç eklemli yoğunlaştırıcılı güneş pilinden % 45, geleneksel tek kristalli silisyum güneş pilinden % 27, çok kristalli silisyum güneş pilinden ise % 22 seviyesinde verim elde edilebilmektedir.

CPV'lerde güneş ışığını küçük boyutlu fotovoltaik hücre üzerine yoğunlaştırmak için genellikle lens kullanılmaktadır [9]. Fresnel lensler küçük hacim, hafiflik, düşük maliyetli olmaları gibi özelliklerinden dolayı son zamanlarda CPV'lerde daha çok tercih edilmektedir [40,41]. Augustin Jean Fresnel tarafından bulunan Fresnel lenslerde, optik karakteristiği cam ile hemen hemen aynı olan ve güneşe olan geçirgenlik ve direncin iyi olduğu PMMA malzemesi kullanılmaktadır.



Şekil 1.24: Çok eklemli fotovoltaik hücre verimlerinin yıllara göre gelişimi [42].

Fresnel lensler düz optik bileşenlerdir ve yüzeyi eş merkezli birçok küçük oluklardan oluşmaktadır. Her bir oluk geleneksel lensteki eğriliği yansıttığından bu oluklar prizma gibi davranış göstermektedir (Şekil 1.25) [40,43].



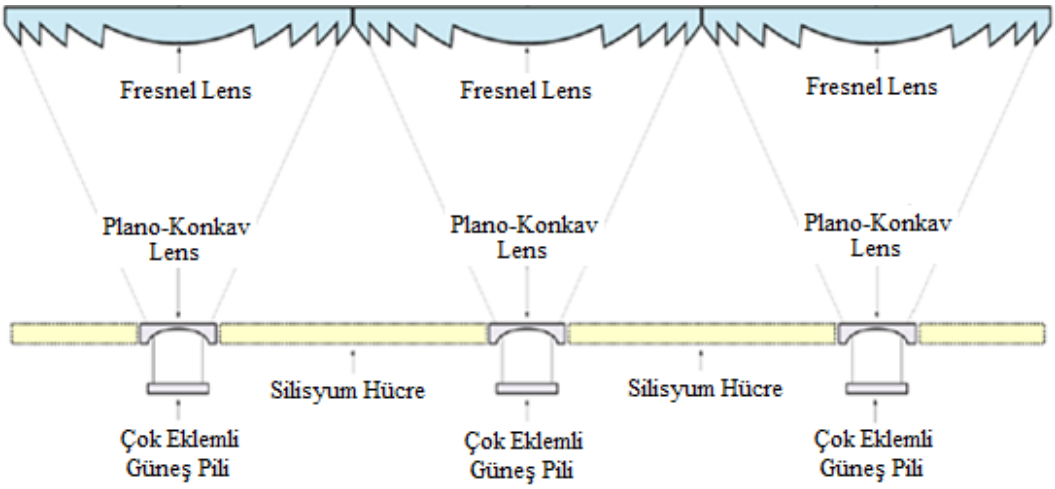
Şekil 1.25: (a) Geleneksel lens, (b) Fresnel lens ve (c) tekli güneş pilli içeren iki takip eksenli CPV sistemi [40,44].

Fresnel lenslerin, görüntülemeli (imaging) ve görüntülemesiz (non-imaging) olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Görüntülemeli Fresnel lens, bir mercek gibi, objeden gelen ışığı kırarak odaklanma yüzeyinde objenin gerçeğinden daha büyük bir görüntü oluştururlar. Genellikle, tek kristalli fotovoltaik hücre üzerine güneş enerjisinin odaklanması amacıyla görüntülemeli Fresnel lensler kullanılmaktadır. Görüntülemesiz Fresnel lensler ise, görüntülemeli Fresnel lenslerin aksine, odaklanma yüzeyinde herhangi bir görüntü oluşturmazlar (Şekil 1.26).



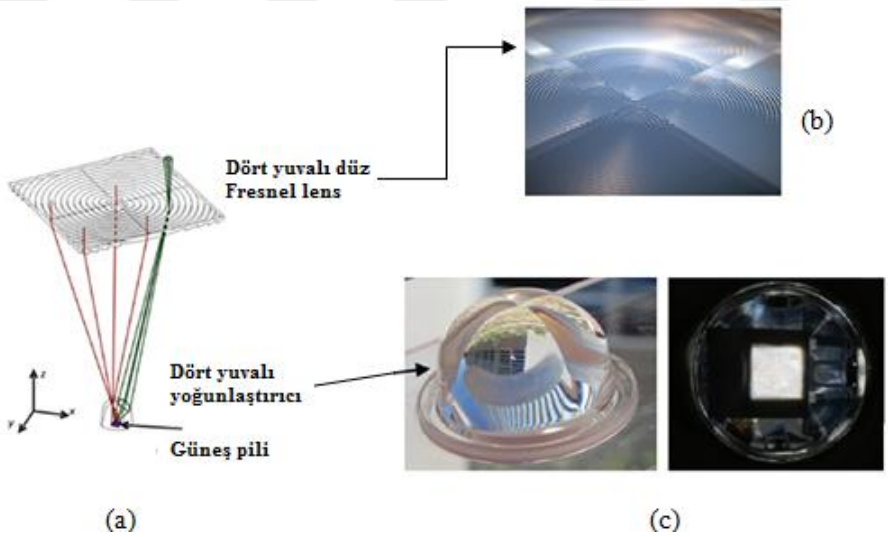
Şekil 1.26: (a) Görüntülemeli Fresnel lens ve (b) görüntülemesiz Fresnel lens.

İdeal bir CPV sistem, CPV ünite dizini ve ilave düşük maliyetli güneş pili içermektedir. Her bir CPV ünitesi; Fresnel lens, ikincil optik eleman (İOE) olarak plano-konkav lens ve çok eklemli (MJ) güneş pilinden oluşmaktadır (Şekil 1.27).



Şekil 1.27: İdeal bir CPV sistem örneği [45].

Lens ve aynalar, güneşe maruz kalan ilk optik bileşen oldukları için birincil optik eleman olarak nitelendirilirler. Bunun devamında modülün açısal toleransını artırmak ve ışını homojenize etmek için ikincil optik eleman gereklidir (Şekil 1.28). Homojenleştirici olarak ikincil optik eleman kullanmanın başlıca sebebi hücre yüzeyinin üniform bir şekilde aydınlatılmadığında hücrenin veriminin düşmesidir [39].

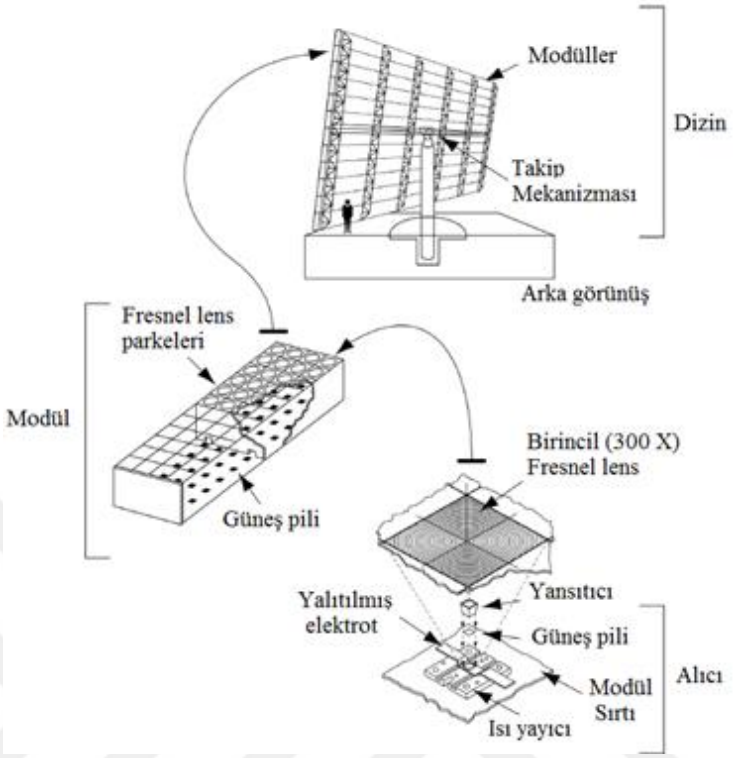


Şekil 1.28: (a) Dört yuvalı Fresnel-Köhler tipi yoğunlaştırıcı, (b) Fresnel lensin gerçek görünüşü, (c) dört yuvalı yoğunlaştırıcı ve güneş pili [46].

1.6.1 Nokta odaklı CPV sistemler

Yoğunlaştırmalı fotovoltaik modüller noktasal odaklı, doğrusal odaklı ve helyostat olmak üzere 3 ana yapı şeklinde düşünülebilir [39].

Nokta odaklı sistemlerde birçok yüksek verimli güneş pilleri kullanılarak yüzlerce elemandan oluşan bir modül oluşturulur (Şekil 1.29).



Şekil 1.29: Nokta odaklı Fresnel lens kullanılan CPV sistemin şematik görünümü [47].

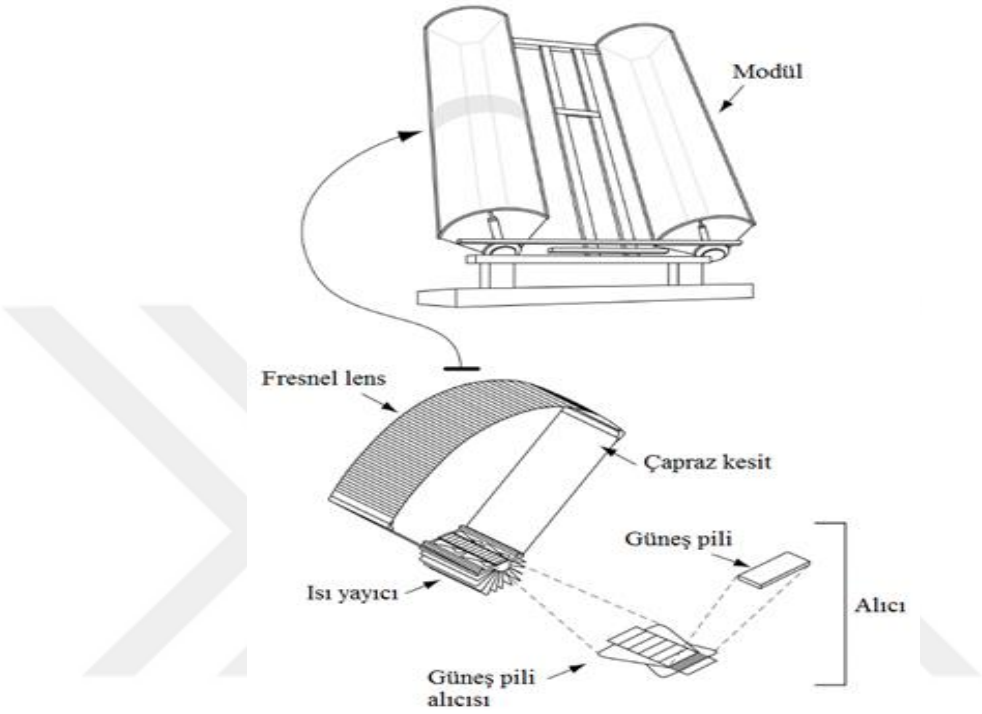
Her bir hücre genelde kare şeklinde belli ölçülerdeki Fresnel lensin altına yerleştirilir. Bu lensler güneş ışığını yüzlerce kez yoğunlaştırarak seri veya paralel bağlı küçük hücrelerin üzerine odaklar. Birincil optik eleman ve hücreler arasına, geliş açısını artırmak ve hücre üzerindeki ışık desenini yumuşatma amacıyla sıklıkla ikincil bir yansıtıcı eleman yerleştirilir [48].

Bu yöntemin başlıca 2 avantajı vardır. Birincisi yüksek yoğunlaşmalara müsaade etmesi, ikinci olarak da hücrenin pasif soğutulmasına uygunluğudur [39].

1.6.2 Doğrusal odaklı CPV sistemler

Doğrusal yoğunlaştırıcılar doğrultu şeklinde yoğunlaşma gerçekleştirirler. Düz Fresnel lensler gibi yansıtıcı prototipler önerilse de, bu sistemler genellikle parabolik profilli güneş olukları ya da V- oluk (düşük yoğunlaşmalarda) şeklindedirler (Şekil 1.30) [48,49].

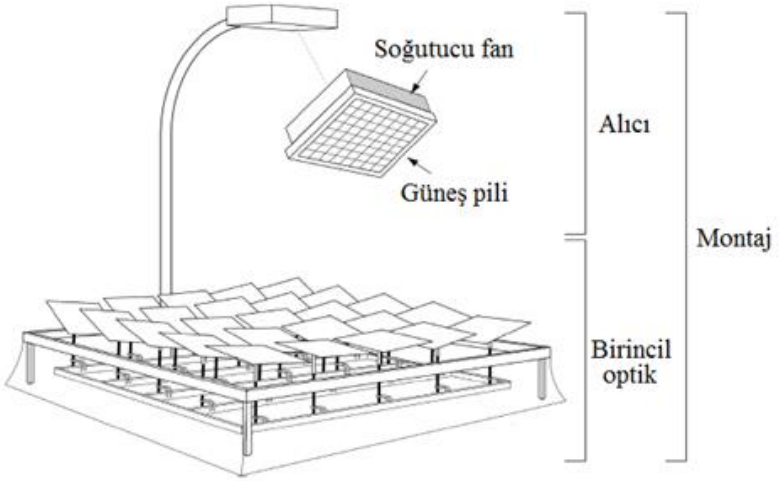
Doğrusal odaklı yoğunlaştırıcılar daha çok güneş enerji santrali (CSP) uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalardaki ana sorun yüksek yoğunluklara ulaşmadaki zorluktur. Klasik 3 J'lük bir güneş pili $3-10\ mm$ ölçüsüne sahiptir. $500\ x$'lik yoğunlaşma faktörü ise $1{,}5-5\ m$ arasında bir parabolik oluk anlamına gelmektedir [39].



Şekil 1.30: Doğrusal odaklı Fresnel lens kullanılan CPV sistemin şematik görünümü [47].

1.6.3 Helyostat tipi CPV sistemler

Helyostat CPV sistemler, çanak denen genellikle parabolik ya da küresel şekilli ayna gibi büyük optik eleman kullanılarak ışınımı, yan yana dizilmiş hücreler sırası üzerine odaklar (Şekil 1.31). Parabolik çanak çerçevesi üzerine monte edilmiş düşük maliyetli aynalar bütünü konkav şekildedir ve hücreler dizisinin tek bir alıcı gibi görünmesini sağlar. Yüksek yoğunlaşmalarda ısı yeterince dağılmazsa PV hücrelerin yüksek sıcaklıktan dolayı verimleri azalacaktır. Bu sistem diğer Fresnel lensli CPV teknolojileriyle kıyaslandığında, yoğunlaştırıcı çanağın geniş olmasından dolayı karmaşık bir görünüme sahiptir. Çünkü bu sistemlerde geniş ölçekli optiklere, aktif soğutmaya ve bütün halinde hücre dizelerine ihtiyaç duyulmaktadır [48].



Şekil 1.31: Helyostat tipi CPV sistemin şematik görünümü [47].

1.7 Literatür Özeti

CPV sistem performanslarının iyileştirilmesine yönelik birçok farklı çalışma mevcuttur. Bu çalışmaları, güneş ışınlarını yoğunlaştırmak için kullanılan optik eleman türüne göre, Fresnel lens ve ayna (düzlemsel, parabolik ve küresel) uygulamalı olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Yoğunlaştırıcı olarak kullanılan aynalar yüksek yüzey hassasiyetine ihtiyaç duyması, büyük hacimli, karmaşık ve maliyetli olmaları gibi birtakım dezavantajlara sahiptirler. Bu nedenle CPV sistemlerde yoğunlaştırıcı olarak, daha düşük maliyetli, daha küçük hacimli, daha hafif ve yüksek optik verime sahip Fresnel lensler tercih edilmektedir.

CPV sistemlerde Fresnel lenslerin kullanılması ile ilgili literatürdeki ilk uygulamalardan bir tanesi Oshida [50] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yine bu alanda yapılan ilk uygulamalardan bir diğeri ise, dairesel Fresnel lens kullanılan bir CPV sistemin optik veriminin ve yoğunlaşma oranı değişiminin deneysel ve analitik olarak incelendiği, Harmon'un [51] çalışmasıdır. Harmon, yapmış olduğu deneysel çalışmada, lens davranışını modellemek amacıyla fotovoltaik tarama tekniği kullanmıştır. Bu çalışmada, lensin düşük yoğunlaşma oranlarında yeterli optik verime sahip olduğu ancak özellikle yüksek yoğunlaşma oranlarında odaklanma mesafesi azaldıkça lensin optik veriminin $\%\,20-80$ oranında düştüğü belirlenmiştir.

James vd. [52] tarafından yapılan çalışmada ise; CPV sistemlerin ekonomik açıdan uygulanabilirliği, fotovoltaik hücre verimlerine, optik verimlerine ve birim alan başına maliyetlerine bağlı olarak sorgulanmıştır. Güneş enerji yoğunluğunun zaman

içerisinde değişim göstermesi fotovoltaik hücre verimlerini düşürdüğü, buna bağlı olarak da birim hücre alanı başına maliyetin arttığı vurgulanmıştır. Uygun güneş takip sistemleri kullanılarak, CPV sistemlerden daha etkin bir şekilde yararlanmanın mümkün olabileceği ifade edilmiş olup, güneş enerji yoğunluğundaki değişim, optik geçirgenlik, birim hücre alanı maliyeti, kullanım ömrü ve güneş takip sistemlerinin Fresnel lens tipi CPV sistem tasarımı için en önemli parametreler olduğu belirtilmiştir.

1980'li yıllarda CPV sistemler ile ilgili çok sayıda çalışma hayata geçirilmiştir. Bu çalışmalar daha çok güneş takip sistemleri, güneş pilleri için soğutma teknolojileri, yüksek yoğunlaşma oranlı sistemler ve farklı görüntülemeli Fresnel lens şekilleri üzerine odaklanmıştır. Nakata vd. [53] 36 ayrı dairesel Fresnel lensten ($40\ mm \times 40\ mm$) oluşan kutupsal eksenli güneş takip sistemine ve $300\ W$ çıkış gücüne sahip nokta odaklı bir CPV sistem tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, Fresnel lens tipi CPV sistemin optik verimi $\%\ 83$ oranında, çıkış gücü ise $\%\ 50$ civarında bulunmuş olup, bu değerlerin klasik lensli sistemlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Shepard vd. [54] pasif soğutmalı nokta odaklı bir CPV sistem çalışması yapmışlardır. CPV sistemlerin en önemli problemi yoğunlaştırılan güneş ışınlarının dağılımıdır. Çünkü fotovoltaik hücreler, maksimum performans için direkt ve homojen bir ışınım akısına ihtiyaç duyarlar. Bu amaçla, Jebens vd. [55] güneş ışınlarının daha homojen olarak fotovoltaik hücre üzerine toplamak amacıyla özel dizayn edilmiş Fresnel lensten oluşan bir CPV sistem tasarlamışlardır. Fresnel lens, merkezine yakın yüzeylere gelen güneş ışınlarını fotovoltaik hücrenin dış sınırları doğrultusunda, hücre üzerine yöneltecek şekilde dizayn edilmiştir. Lens kenarlarına doğru ilerleyen yüzeylerde güneş ışınlarını giderek hücre merkezine doğru yöneltecek şekilde tasarlanmış ve bu sayede fotovoltaik hücre üzerinde düzgün bir güneş ışınım dağılımının elde edilmesi planlanmıştır. Sonuç olarak, belirli bir odaklanma derinliğine sahip Fresnel lens için fotovoltaik hücre yüzeyi boyunca sabit bir güneş ışınım yoğunluğu elde edilmiştir.

Jebens vd. [55]'nin çalışmasına ilave olarak Akhmedov vd. [56], dairesel Fresnel lensli nokta odaklı CPV sistemin geometrik parametrelerini hesaplamak için bir yöntem geliştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, dairesel Fresnel lensli bir CPV sistemde, fotovoltaik hücre üzerinde düzgün bir güneş ışınım dağılımı elde

edebilmek için CPV sistemin geometrik yoğunlaşma oranının 3000'in üzerinde olması gerektiği görülmüştür.

Soluyanov vd. [57], gerçek lens hataları, takip sisteminin güneş hareketine karşı verdiği cevabın doğruluğu, eksenel ve yanal odak ayarsızlığı gibi temel optik tasarım parametrelerini dikkate alarak, Fresnel lens tipi bir CPV sistemde güneş ışınım yoğunluğunun dağılımını belirlemek üzere bir hesap yöntemi geliştirmiştir.

1990'lı yıllardan itibaren, görüntülemeli Fresnel lens uygulamalı CPV sistemler ile ilgili araştırmaların olgunlaştığını ve uzay uygulamalarından [58,59] karasal uygulamalara [60] kadar birçok farklı alanda meyvelerinin verilmeye başlandığını söylemek mümkündür. Whitfield vd. [61], iki eksenli güneş takip özelliğine sahip nokta odaklı ve doğrusal odaklı Fresnel lens uygulamalı çok sayıda farklı CPV sistem tasarımlarını karşılaştırmışlardır. Düzlemsel Fresnel lens uygulamalı iki eksenli güneş takip özelliğine sahip nokta odaklı CPV sistemlerin; güneş ışınlarını maksimum düzeyde yoğunlaştırma potansiyeli, seri üretimlerinin basit oluşu ve evlerde ısı alıcı olarak kullanılabilmeleri gibi avantajlarının bulunduğu, buna karşın en büyük dezavantajının ise iki eksenli güneş takip sisteminden kaynaklanan yüksek maliyeti olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, $f < 1{,}1$ için düzlemsel Fresnel lens uygulamalı CPV sistemlerin verimlerinin, geniş geliş açısından kaynaklanan yüksek yansıma kayıplarından dolayı, kubbe şeklindeki (domed) konveks Fresnel lens uygulamasından daha düşük olduğu belirtilmiştir.

İdeal bir CPV sistemin, güneş ışığını fotovoltaik hücre üzerine üniform bir şekilde yoğunlaştırması beklenir. Ancak CPV sistemlerde kullanılan optik elemanlar tam olarak üniform bir yoğunlaştırma sağlayamazlar. Bu yüzden, CPV sistemlerin en bilindik probleminden bir tanesi fotovoltaik hücre üzerindeki uniform olmayan güneş ışınım yoğunluğudur [62]. Bu nedenle, CPV sistemlerde fotovoltaik hücre üzerinde daha uniform güneş ışınım yoğunluğu sağlamak amacıyla birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başında, ikincil optik eleman (İOE) kullanımı gelmektedir [45].

Moffat vd. [63], kubbe şeklinde (domed) konveks yapıda Fresnel lens kullanılan yüksek yoğunlaşma oranına sahip nokta odaklı bir CPV sistemin optimizasyonu üzerine bir çalışma düzenlemişlerdir. Bu çalışmada, ayrıca optik verimi iyileştirmek

amacıyla İOE kullanılarak CPV sistemin performansı test edilmiş ve İOE'nin sistem performansında kayda değer bir katkı sağladığı belirlenmiştir.

CPV teknolojisi, yüksek verime sahip çok eklemli güneş pillerini kullanarak diğer PV teknolojilerden çok daha fazla güç elde etmeyi amaçlamaktadır. CPV'nin maliyeti ve güvenilirliği sistem gelişimini sınırlayan birincil nedenlerdir. Bu özellikleri iyileştirmek adına Huang vd. [64], tasarladıkları CPV sistemde maliyeti azaltmak için ikincil bir optik eleman kullanmışlardır. Teorik ve deneysel araştırmalar, $625\ x$ yoğunlaştırma oranına sahip düz bir Fresnel lens ve kesik küre lens kullanan sistem üzerinden yürütülmüştür. Test sonuçlarından $\%\ 83{,}3$ doluluk faktörü ile birlikte verim $\%\ 30{,}1$; hücre sıcaklığı $25\ ℃$ ve ışınım şiddeti $830\ W/m^2$ için kabul açısı $0{,}73°$ elde edilmiştir. Ayrıca kesik küre lenslerin gelecekte CPV sistemler için performans, maliyet ve güvenilirlik açısından mükemmel bir seçenek olacağı vurgulanmıştır.

Himer vd. [65], yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistem için dört farklı İOE kullanarak CPV sistemin performansını kıyaslamışlardır. Çalışmada birincil optik eleman (BOE) olarak $350\ mm$ çap ve $370\ mm$ odak mesafesine sahip PMMA malzemeli Fresnel lens tercih edilmiştir. İOE olarak ise ayrı ayrı birleşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC), çapraz birleşik parabolik yoğunlaştırıcı (crossed CPC), koni ve piramit kullanılmıştır. Bk7 (n=1,51) ve B270 (n=1,52) malzemeleri kullanılarak her bir İOE'nin çıkışındaki akı yayılımı ve optik verim analiz edilmiştir. Geometrik değerlendirmeler, malzemenin kırılma endeksi arttıkça 4 adet İOE'nin uzunluğu ve giriş açıklık boyutunun da arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca hangi malzemeden olursa olsun piramit tipi İOE'nin daha uniform ışınım saçılımı ve yüksek optik verimi sağladığı belirtilmiştir.

Victoria vd. [66], yansıtıcı ve kırıcı özelliğe sahip farklı İOE'lerin optik verimini, kabul açısını ve hücre üzerine düşen ışınım saçılımını ışın izleme yöntemiyle incelemişlerdir. BOE olarak yuvarlak plano-konkav lens, İOE olarak ise ayrı ayrı yansımalı kesik koni, yansımalı kesik piramit, CPC, Kubbe A ve Kubbe B tipleri kullanılmıştır. Yapılan analizlere göre ters çevrilmiş koni veya piramit en iyi optik verimi sağlamıştır. CPC ve Kubbe B ise geniş kabul açısına müsaade etmiştir. Bunun yanında Kubbe A ise hücre üzerindeki en üniform ışınım saçılımını oluşturmuştur.

Chen vd. [67], silisyum camlı bir Fresnel lens ile birlikte KOD, KFTS ve SP olmak üzere 3 tip İOE kullanılan CPV sistem üzerinden bir kıyaslama yapmışlar ve $550\ nm$ dalga boyunda ışın izleme simülasyonu ile hangi uygulamada yüksek verim ve kabul açısını elde edebileceklerini test etmişlerdir. Her bir İOE için başlangıç ve optimum dizayn belirlenmiş ve nihai optik performanslar simule edilmiştir. Analizler sonucunda $1{,}7°$'lik en yüksek kabul açısına ve aynı zamanda iyi bir optik verime sahip olan KOD, en ideal İOE olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte SP tipi İOE ise güneş pili üzerinde en iyi ışınım saçılımı sergilemiştir.

Chen vd. [68], bir CPV sistem tasarlamış, tek Fresnel lens ve çeşitli İOE kullanarak yoğunlaştırıcının optik performansını ışın izleme (ray-tracing) yöntemiyle analiz etmişlerdir. Yapılan optik simülasyonda hem kırıcı hem de yansıtıcı tip İOE'ler değerlendirilmiştir. Dört farklı yoğunlaştırıcı tasarımı için optik verim ve kabul açısı hesap edilmiş, analiz sonucuna göre yansıtıcı koni tip İOE'nin en iyi optik performansa sahip olduğu bulunmuştur.

Rodriguez vd. [69], nokta odaklı Fresnel lens ve iki farklı İOE (kubbeli kaleydoskop ve tek lensli) ve üç eklemli güneş pili kullanarak iç mekanda ışın izleme yöntemiyle tasarladıkları CPV sistemi simule etmişlerdir. Işın izleme simülasyonları, gelen ışığa nazaran normal hizalama ve farklı eğim açısına göre yürütülmüştür. Kabul açısı karakteristik eğrisi bakımından değerlendirildiğinde kubbeli kaleydoskop tipi optik eleman kullanılan HCPV, tek lensli olana nazaran daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Tien vd. [45], yaptıkları çalışmada bir CPV sistem tasarlamışlar ve sistem verimi ile ışınım saçma uniformluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Tasarladıkları CPV sistemde güneş ışığını yoğunlaştırmak ve odaklamak için BOE olarak Fresnel lens ve çok eklemli hücrenin üzerine uniform bir şekilde dağıtmak için İOE olarak da plano-konkav lens kullanmışlardır. Ayrıca sisteme düşük maliyetli güneş pilleri eklenerek yayılı güneş ışınımından da yararlanılmıştır. Analiz ve simule edilen sonuçlar neticesinde verimle beraber ışın saçma uniformluğunda geleneksel CPV sisteme kıyasla önemli bir artış sağlanmıştır. Ayrıca İOE ve düşük maliyetli hücre ile tasarlanan model, ilave hücreyi kullanmayan geleneksel CPV'lere kıyasla $\%\,17{,}12$'lik; hem İOE hem de düşük maliyetli hücre kullanmayan geleneksel CPV'lere kıyasla ise yaklaşık $\%\,10{,}26$'lık optik güç oran artışı sağlandığı görülmüştür.

Renzi vd. [70], çalışmalarında HCPV prototipinde kullandıkları $4{,}15\ mm^2$ alana sahip üç eklemli güneş pili (GaInP, GaInAs ve Ge) performansı üzerinde İOE'nin nasıl etki ettiğini analiz etmişlerdir. Sistem $75\ mm$ ebatında PMMA malzemeden oluşan kare Fresnel lens ve dielektrik malzemeden oluşan kırıcı İOE'den oluşmakta olup, toplam yoğunlaşma oranı $1300\ x$ olarak belirlenmiştir. Dış ortam testleri sonucunda birincil optik kayıplar ihmal edildiğinde elektriksel verimin $\%\ 39{,}55$ olduğu saptanmıştır.

Himer vd. [71], yaptıkları çalışmada farklı odak mesafelerinde görüntülemesiz Fresnel lens ve görüntülemesiz Fresnel lens + piramit optik eleman (İOE olarak) kullanarak sistem performansını kıyaslamışlardır. Analiz sonuçlarına göre İOE'nin güneş pili üzerinde homojenliği artırma ve yüksek toleransa müsaade etme anlamında önemli rol oynadığı ortaya konmuştur. Ayrıca CPV sistem konfigürasyonunda odak mesafesinin kabul açısını azalttığı vurgulanmıştır.

Şahin vd. [72], iki kademeli yoğunlaştırıcının optik tasarımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. BOE olarak yuvarlak Fresnel lens, İOE olarak ise kırınım yüzeyli düzlemsel bir eleman kullanılmıştır. Güneş pilinin üzerine yoğunlaştırılan güneş ışığı dalga boylarında minimum yuvarlak ve renkli sapmaları elde etmek için CPV sistem optimize edilmiştir. $10\ mm$ kalınlığa sahip kırınımlı İOE kullanılan uygulamada kabul açısı $\pm 0{,}55°$, optik verim ise 0,87 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu uygulamanın tek kademeli sisteme nazaran optik verimi ve kabul açısını artırdığı, tolerans hassasiyetini ise azalttığı vurgulanmıştır.

1.8 Tezin Amacı

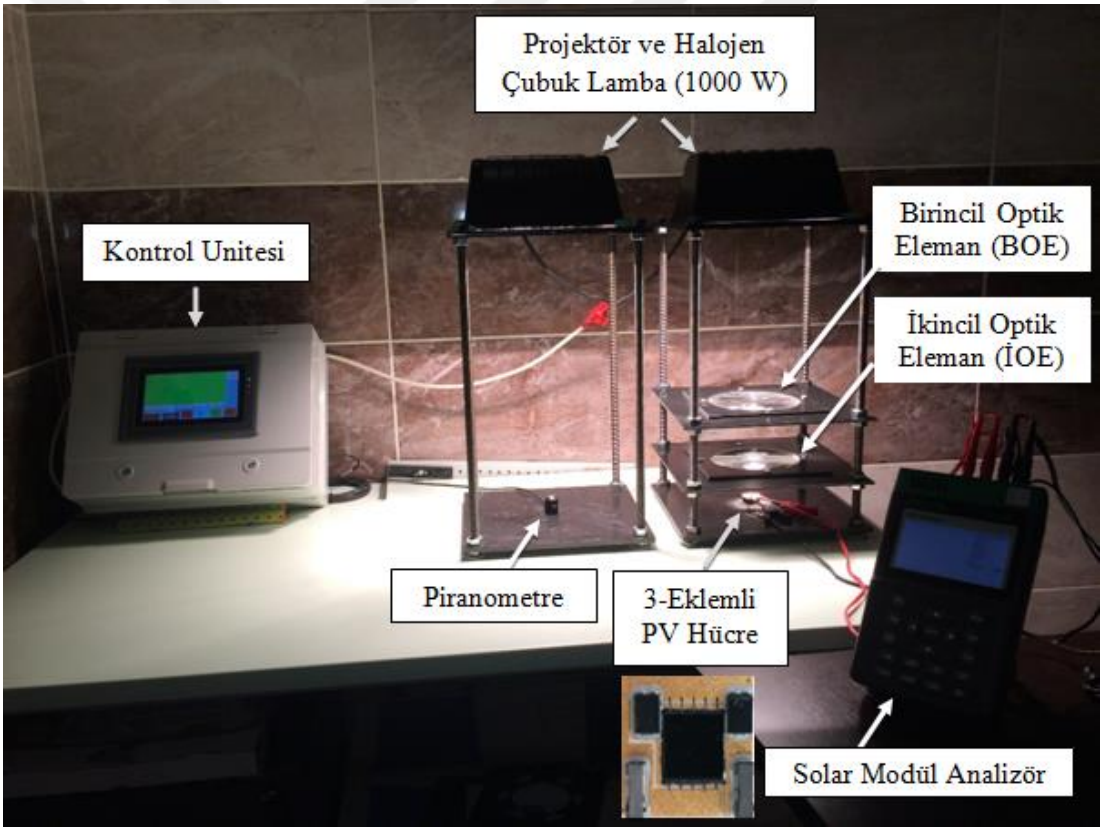
"*Dünya insanlara atalarından miras kalmamıştır, insanlar onu evlatlarından ödünç almışlardır*" der güzel bir söz. Ancak insanoğlu adeta kötü bir mirasyedi gibi dünyaya verebileceği zararları pek de önemsemeden, çok uzun yıllardır en temel ihtiyacı olan enerjiyi temin etmek amacıyla fosil yakıtları kullanmaktadır. Bilindiği üzere, fosil yakıtlar karbon içeriklidir ve enerji üretmek için yakıldıklarında karbondioksit (CO_2) gazı açığa çıkarırlar. CO_2 gazı ise dünya üzerinde bir sera etkisi oluşturarak küresel iklim değişikliğine yol açtığı, günümüz bilim insanları tarafından ortaya konmuştur. Öyle ki, artık insanoğlu, karbon emisyonunun tetiklediği iklim değişikliğinin neden olduğu; aşırı sıcaklar, buzulların erimesi, seller, kasırgalar ve kuraklık gibi sıra dışı çevresel sorunlarla karşı karşıyadır. Hatta bazı bilim insanları,

fosil yakıtların bu hızla kullanımına devam edilmesi halinde; yüzyılın sonunda bu sıra dışı doğa olayların insanoğlunun sıklıkla karşılaştığı sıradan olaylar haline geleceğini ileri sürmektedir. Bu nedenle günümüz dünyasında enerji, insanoğlu için bir ihtiyaç olmanın yanında çözülmesi gereken en önemli sorunların da başında gelmektedir. Bu durum, dikkatleri yeni, temiz ve yenilenebilir enerji teknolojilerin geliştirilmesine yöneltmiştir. Bu teknolojiler arasında, son yıllarda güneş ışınlarının optik elemanlar ile çok eklemli fotovoltaik hücre üzerine odaklanarak, klasik fotovoltaik sistemlere göre daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlanan "Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik Sistem (Concentrated Photovoltaic System, CPV)" uygulamalarının öne çıktığı göze çarpmaktadır. CPV sistemlerde yoğunlaştırıcı optik eleman olarak farklı lensler ve aynalar kullanılmakla birlikte, düşük maliyet ve uygulama kolaylığı nedeniyle, Fresnel lens kullanımı oldukça yaygındır. Mevcut literatürdeki araştırmaların, genellikle farklı optik özelliklere sahip tek Fresnel lens uygulamaları üzerine yoğunlaştığı, buna karşın çift Fresnel lens kullanılan CPV sistemler ile ilgili yeterli çalışma bulunmadığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, farklı optik özelliklere sahip nokta odaklı Fresnel lens çiftlerinden oluşan farklı çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonları göz önüne alarak, birincil ve ikincil optik eleman yoğunlaşma oranları, f sayıları ve lensler arası mesafenin CPV sistem performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmak ve elde edilecek bulgular yardımı ile ilgili parametrelerin CPV sistem performansı üzerindeki etki oranları hakkında ANOVA yöntemine dayalı istatistiki öngörülerde bulunmaktır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, farklı optik özelliklere sahip iki adet yoğunlaştırıcı optik elemanın kullanıldığı bir CPV sistemin performans parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla aydınlatma ünitesi, yoğunlaştırıcı optik eleman ve yoğunlaştırılmış çok eklemli fotovoltaik hücreden oluşan bir CPV sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Deney düzeneği.

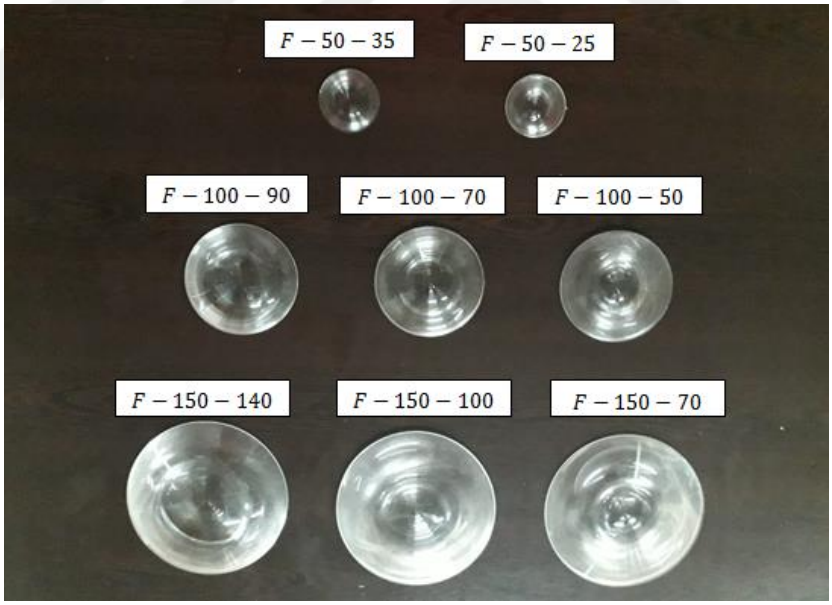
2.2 Deney Ekipmanları

Deneysel çalışmada optik eleman olarak Şekil 2.2'de yer alan farklı optik özelliklere sahip sekiz adet nokta odaklı görüntülemeli PMMA (Polimetilmetakrilat) Fresnel lens kullanılmış olup, lens özellikleri Çizelge 2.1'de belirtilmiştir. Çizelgede

belirtilen, odak mesafesi (F_L); ilgili lensin güneş piline olan optimum uzaklığı, yoğunlaşma oranı (C); lens alanının güneş pili alanına oranı ve *f* sayısı ise lensin optimum odak mesafesinin lens çapına oranı şeklinde ifade edilmektedir.

Çizelge 2.1: Optik eleman ve karakteristikleri.

Optik Eleman No	**Çap (Ø) (mm)**	**Odak Mesafesi (F_L) (mm)**	**Yoğunlaşma Oranı (C)**	***f* Sayısı**
F1	150	140	176,7	0,93
F2	150	100	176,7	0,67
F3	150	70	176,7	0,47
F4	100	90	78,5	0,9
F5	100	70	78,5	0,7
F6	100	50	78,5	0,5
F7	52	35	21,2	0,67
F8	52	25	21,2	0,48



Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan Fresnel lensler.

Tasarlanan CPV sistemde, teknik özellikleri Çizelge 2.2'de verilen, Azur Space firmasına ait $10\,mm\,x\,10\,mm$'lik 3C42 tipi üç eklemli (InGaP-InGaAs-Ge) yoğunlaştırılmış fotovoltaik hücre kullanılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Yoğunlaştırılmış PV hücre.

Çizelge 2.2: Yoğunlaştırılmış PV hücre teknik özellikleri.

	I_{SC} (A)	V_{OC} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W_{MPP})	FF (%)	η (%)
250 x	3,79	3,07	3,71	2,80	10,40	89,4	41,4
500x	7,58	3,12	7,42	2,79	20,71	87,6	41,2
1000 x	15,07	3,16	14,77	2,64	39,00	81,9	38,8

Deneyler iç ortam koşullarında yapıldığı için, yapay güneş ışınımı sağlamak amacıyla, literatürde birçok çalışmada [12] olduğu gibi, her biri 1000 W gücündeki iki adet Philips tungsten-halojen çubuk lamba ve projektörden oluşan bir aydınlatma ünitesi tasarlanmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: (a) Tungsten-halojen çubuk lamba ve (b) aydınlatma ünitesi.

Aydınlatma ünitesinden PV hücre üzerine düşen güneş ışınım akısının ölçümü için Vernier PYR-BTA piranometre kullanılmıştır. Kullanılan piranometrenin görünümü Şekil 2.5'te, teknik özellikleri ise Çizelge 2.3'te yer almaktadır.



Şekil 2.5: Vernier PYR-BTA marka piranometre.

Çizelge 2.3: Piranometre teknik özellikleri.

Işın Saçma Aralığı	$0 - 1100$ W/m^2
Mutlak Doğruluk	$\% \pm 5$
Tekrarlanabilirlik	$\% \pm 1$
Kosinüs Yanıtlama	45° zenit açısında % 1, 75° zenit açısında $\% \pm 5$
Dalga Boyu Aralığı	$370 - 1140$ nm
Çekilen Akım	300 µA
Çıkış Sinyali	0 – 4,4 V
Çözünürlük	0,3 W/m^2
Sensör çapı	2,4 cm
Sensör yüksekliği	2,75 cm
Malzeme	Dökme akrilik lensli anotlanmış alüminyum

Aydınlatma ünitesi, piranometre ile senkronize çalışarak CPV sistemin istenilen güneş ışınım değerinde sabit kalmasını sağlayan PLC tabanlı bir kontrol ünitesine sahiptir (Şekil 2.6).





Şekil 2.6: Kontrol ünitesi.

CPV sistemin performans parametrelerini tespit etmek amacıyla PV hücrenin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri, teknik özellikleri Çizelge 2.4'te verilen, PROVA 210 solar modül analizörü kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Solar modül analizörü.

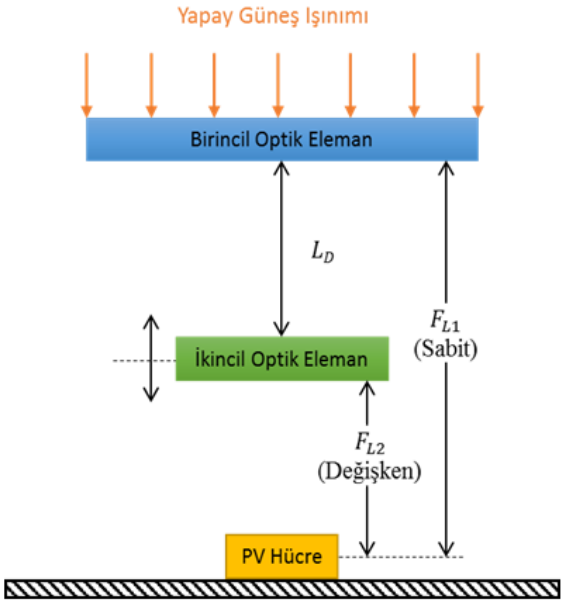
Çizelge 2.4: Solar modül analizör teknik özellikleri.

Solar hücre I-V Eğri Ölçümü	✓
Otomatik (P_{max}) taraması	60 V, 12 A
Çözünürlük	1 mV, 1 mA
Açık devre gerimi (V_{OC})	✓
Kısa devre akımı (I_{SC})	✓
Solar panelin verimlilik (%) hesabı	✓
Eş zamanlı veri kaydı	✓
Solar panel alan ayarı	$0{,}001 - 9999$ m^2
USB kablo ile PC bağlantısı	✓
Hafıza	100 kayıt
Veri kayıt süresi	$0 - 99$ dakika
Güneş kaynak ayarı	$10 - 1000$ W/m^2
Alarm işlemi için minimum güç ayarı	✓

2.3 İç Ortam Testleri

İç ortam testleri, 500 ve $1000\,W/m^2$ güneş ışınım şiddeti altında, optik özellikleri Çizelge 2.1'de sunulan Fresnel lenslerin farklı kombinasyonlarından oluşan 34 ayrı durum için gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2.5). Buna göre, $D0$ deneyi herhangi bir optik elemanın kullanılmadığı referans durumu, $D1 - D8$ deneyleri tek optik eleman kullanılan durumları, $D9 - D33$ deneyleri ise çift optik eleman kullanılan durumları temsil etmektedir. Deneylerde kullanılan optik elemanlar $F - 150$ (optik eleman çapı, mm) – 140 (optik eleman odak mesafesi, mm) şeklinde isimlendirilmiştir. İki optik elemanın kullanıldığı $D9 - D33$ deneylerinde birincil optik eleman kendi odak

mesafesinde sabit tutulmuş, ikincil optik eleman ise düşey doğrultuda hareket ettirilerek lensler arası mesafenin farklı değerleri için akım-gerilim ($I-V$) ve güç-gerilim ($P-V$) karakteristik eğrileri tespit edilerek CPV sistem performansları incelenmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Deney düzeneği şematik gösterimi.

PV hücrenin akım-gerilim ($I-V$) ve güç-gerilim ($P-V$) karakteristik eğrileri, solar modül analizörden okunan ayrık verilere, Akbaba ve Alattawi [73] tarafından önerilen model yardımı ile eğri uyumlanarak elde edilmektedir. Akbaba ve Alattawi [73] PV hücrenin akım-gerilim ($I-V$) karakteristiği için okunan V_{oc} açık devre gerilimi ve I_{sc} kısa devre akımına bağlı olarak aşağıdaki modeli önermişlerdir (Denklem 2.1-2.3).

$$I = \frac{V_{oc} - V}{A + BV^2 - CV} \tag{2.1}$$

$$A = V_{oc}/I_{sc},\ B = (K_1 - K_2)/K_3,\ C = (K_1 V_a - K_2 V_b)/K_3 \tag{2.2}$$

$$K_1 = V_a I_a (V_{oc} - V_b - A I_b) \tag{2.3a}$$

$$K_2 = V_b I_b (V_{oc} - V_a - A I_a) \tag{2.3b}$$

$$K_3 = V_a I_a V_b I_b (V_b - V_a) \tag{2.3c}$$

Yukarıdaki ifadelerde yer alan I_a ve I_b için sırası ile $0.94I_{sc}$ ve $0.64I_{sc}$ değerleri önerilmiş olup V_a ve V_b için ise uygun değerler seçilerek eğri uyumlama işlemi tamamlanmaktadır.

Çizelge 2.5: Deney Listesi.

Deney No	Birincil Optik Eleman	İkincil Optik Eleman
$D0$	–	–
$D1$	$F-150-140$ *	–
$D2$	$F-150-100$	–
$D3$	$F-150-70$	–
$D4$	$F-100-90$	–
$D5$	$F-100-70$	–
$D6$	$F-100-50$	–
$D7$	$F-52-35$	–
$D8$	$F-52-25$	–
$D9$	$F-150-140$	$F-150-100$
$D10$	$F-150-140$	$F-150-70$
$D11$	$F-150-140$	$F-100-90$
$D12$	$F-150-140$	$F-100-70$
$D13$	$F-150-140$	$F-100-50$
$D14$	$F-150-140$	$F-52-35$
$D15$	$F-150-140$	$F-52-25$
$D16$	$F-150-100$	$F-150-70$
$D17$	$F-150-100$	$F-100-90$
$D18$	$F-150-100$	$F-100-70$
$D19$	$F-150-100$	$F-100-50$
$D20$	$F-150-100$	$F-52-35$
$D21$	$F-150-100$	$F-52-25$
$D22$	$F-150-70$	$F-100-50$
$D23$	$F-150-70$	$F-52-35$
$D24$	$F-150-70$	$F-52-25$
$D25$	$F-100-90$	$F-100-70$
$D26$	$F-100-90$	$F-100-50$
$D27$	$F-100-90$	$F-52-35$
$D28$	$F-100-90$	$F-52-25$
$D29$	$F-100-70$	$F-100-50$
$D30$	$F-100-70$	$F-52-35$
$D31$	$F-100-70$	$F-52-25$
$D32$	$F-100-50$	$F-52-35$
$D33$	$F-100-50$	$F-52-25$

* F – 150 (optik eleman çapı, mm) – 140 (optik eleman odak mesafesi, mm) şeklinde isimlendirilmiştir.

Ayrıca şunu da vurgulamak gerekir ki, PV hücrenin akım-gerilim ($I-V$) ve güç-gerilim ($P-V$) karakteristiklerinin tespiti amacıyla yapılan ölçümler, anlık gerçekleştirildiği için sıcaklığın, hücre performansı üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir.

2.4 Deneysel Ölçümler İçin Tutarlılık Analizi

Yoğunlaştırılmış PV hücre karakteristiğinin tespitine yönelik yapılan deneysel ölçümlerin iç tutarlılığını test etmek amacıyla seçilen deneyler için yapılan ölçümler üçer kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin tutarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Tekrarlanan ölçümlerin tutarlılıklarını yansıtmak için Cronbach alfa katsayısı [74] değerleri hesaplanmıştır. Cronbach alfa katsayısı, aynı durum için gerçekleştirilen farklı testlerin ya da ölçümlerin ne kadar yakından ilişkili olduğunu göstermek amacıyla kullanılan bir iç tutarlılık ölçüsüdür. Cronbach alfa katsayısı, ölçüm verilerinin sayısının ve ölçümler arasındaki ortalama korelasyonun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır (Denklem 2.4).

$$\alpha_{\text{Cronbach}} = \frac{n}{n\text{-}1}\left(1\text{-}\frac{\sum V_{\text{i}}}{V_{\text{t}}}\right) \tag{2.4}$$

Burada, n ölçüm sayısını, V_i ölçüm çiftleri arasındaki ortalama kovaryansı ve V_t ortalama varyansı temsil etmektedir. İdeal bir ölçüm sonucunun Cronbach alfa katsayısı 0,7'nin üzerinde olması beklenir [74].

Deneysel ölçümlerin iç tutarlığını belirlemek amacıyla farklı birincil ve ikincil optik eleman özelliklerine sahip $D9$, $D10$, $D16$, $D25$ ve $D26$ numaralı deneyler için yapılan ölçümlerin tutarlılık analizleri yapılmıştır. Çizelge 2.6'da seçilen deneyler için yapılan ölçümlerin tutarlılık analizlerine ilişkin, ölçümler arası ilişki korelasyonu ve her bir deneye ait ölçümün Cronbach alfa katsayısı değerleri sunulmuştur. Ölçümler arası ilişki korelasyonu her bir deney için yapılan ölçümlerin kendi içerisindeki ilişkisini, Cronbach alfa katsayısı ise her bir deney için yapılan ölçümün genel tutarlılığını yansıtmaktadır. Buna göre, Çizelge 2.6 incelendiğinde ölçümler arası ilişki korelasyonu ve Cronbach alfa katsayısı değerlerinin 0,9'dan büyük olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum deneysel ölçümler arası tutarlılığın son derece yüksek olduğunu kanıtlayıcı niteliktedir.

Çizelge 2.6: Deneysel ölçümlerin güvenilirlik analizi verileri.

İlişki Korelasyonu Matrisi				**Cronbach Alfa Katsayısı**
$\boldsymbol{D9}$ $\boldsymbol{(L_D = 40\ mm)}$	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,960	0,995	0,992
Ölçüm - 2	0,960	1,000	0,981	
Ölçüm - 3	0,995	0,981	1,000	
$\boldsymbol{D10}$ $\boldsymbol{(L_D = 90\ mm)}$	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,985	0,922	0,970
Ölçüm - 2	0,985	1,000	0,892	
Ölçüm - 3	0,922	0,892	1,000	
$\boldsymbol{D16}$ $\boldsymbol{(L_D = 70\ mm)}$	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,870	0,820	0,901
Ölçüm - 2	0,870	1,000	0,991	
Ölçüm - 3	0,820	0,991	1,000	
D25 $\boldsymbol{(L_D = 50\ mm)}$	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,959	0,973	0,974
Ölçüm - 2	0,959	1,000	0,901	
Ölçüm - 3	0,973	0,901	1,000	
D26 $\boldsymbol{(L_D = 60\ mm)}$	Ölçüm - 1	Ölçüm - 2	Ölçüm - 3	
Ölçüm - 1	1,000	0,906	0,922	0,970
Ölçüm - 2	0,906	1,000	0,994	
Ölçüm - 3	0,922	0,994	1,000	

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak optik eleman kullanımının CPV sistem performansı üzerindeki etkileri tek ve çift optik eleman kullanıldığı durumlar için irdelenecektir. Daha sonra, ikincil optik elemanın yoğunlaşma oranı, f sayısı gibi optik özelliklerinin ve optik elemanlar arasındaki mesafenin CPV sistem performansını nasıl etkilediği alt başlıklar altında tartışılacaktır. Son olarak, birincil ve ikincil optik eleman özelliklerinin sistem performansı üzerindeki ağırlıklı etkisini görmek amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) yöntemini kullanarak istatistiki değerlendirmeler yapılacaktır.

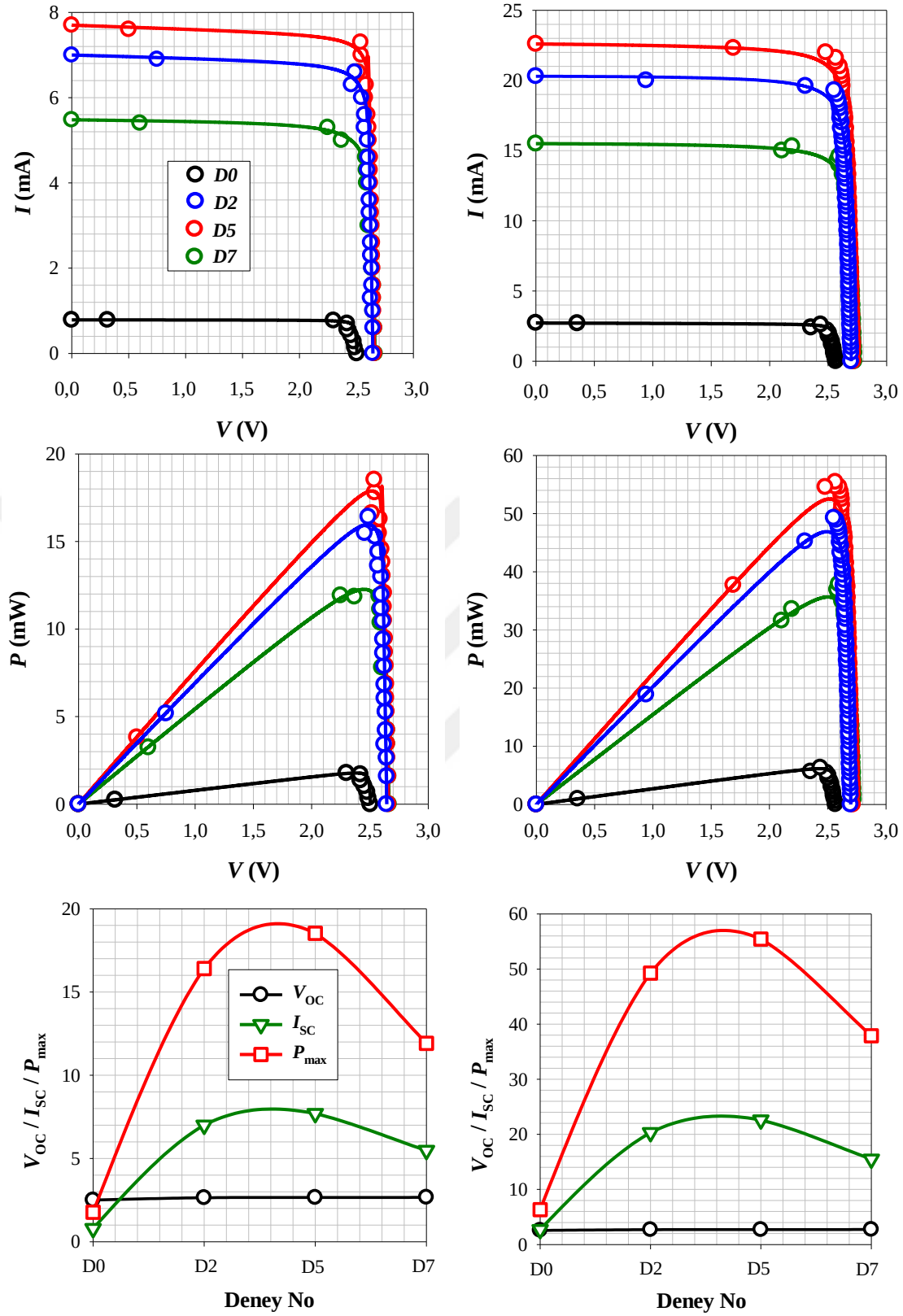
3.1 Optik Eleman Kullanımının Etkisi

3.1.1 Tek optik eleman kullanımının etkisi

Şekil 3.1'de, $G = 500\ W/m^2$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti değerleri için $D0$, $D2$, $D5$ ve $D7$ numaralı deneylere ait akım - gerilim $(I-V)$ ve güç - gerilim $(P-V)$ karakteristik eğrileri ile açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akımı (I_{SC}) ve maksimum güç (P_{max}) gibi CPV sistemin temel performans parametrelerinin değişimi sunulmuştur. $D0$ numaralı deney herhangi bir optik eleman kullanılmadığı referans durumu temsil ederken; $D2$, $D5$ ve $D7$ numaralı deneyler sırası ile $F-150-100$, $F-100-70$ ve $F-52-35$ olmak üzere aynı f $(\sim 0{,}7)$ sayılarına ve farklı yoğunlaşma oranlarına sahip Fresnel lensler kullanılan deneyleri temsil etmektedir. $D2$, $D5$ ve $D7$ numaralı deneylerde kullanılan Fresnel lensler kendi odak mesafelerine ayarlanarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve tek optik eleman kullanımının CPV sistem performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Şekil 3.1 incelendiğinde, dikkate alınan $G = 500\ W/m^2$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti değerleri için, tek optik eleman yardımıyla güneş ışınlarını odaklayarak PV hücre üzerindeki güneş ışınım yoğunluğunu artırmak, PV hücrenin akım - gerilim $(I-V)$ karakteristiğinin önemli ölçüde iyileşmesini ve buna bağlı olarak da CPV sistemin üretmiş olduğu gücün ciddi oranda artmasını sağladığını söylemek mümkündür.

CPV sistem performans parametreleri açısından bakıldığında, tek optik eleman kullanımı ile V_{OC} açık devre gerilimi değerlerinde belirgin bir farklılık ortaya çıkmazken, I_{SC} kısa devre akımı ve P_{max} maksimum güç değerlerinde önemli bir artış meydana geldiği göze çarpmaktadır. $G = 500\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti için yapılan ölçümlerde, herhangi bir optik elemanın kullanılmadığı $D0$ numaralı referans deneyde, kısa devre akımı $I_{SC} = 0{,}79\ mA$ olarak okunmuştur. Buna karşın, $D0$ numaralı referans deneyine göre, yoğunlaşma oranı $C = 176{,}7$ olan $F - 150 - 100$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan $D2$ numaralı deneyi için, yaklaşık $\%\,786$ artışla, $I_{SC} = 7\ mA$; yoğunlaşma oranı $C = 78{,}5$ olan $F - 100 - 70$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan $D5$ deneyi için, yaklaşık $\%\,875$ artışla, $I_{SC} = 7{,}7\ mA$ ve yoğunlaşma oranı $C = 21{,}2$ olan $F - 52 - 35$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan $D7$ deneyi için ise yaklaşık $\%\,594$ artış ile $I_{SC} = 5{,}48\ mA$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.1a). $G = 1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddetinde yapılan ölçümlerde ise $D0$ referans deneyi için $I_{SC} = 2{,}72\ mA$ iken, $D2$ deneyi için $I_{SC} = 20{,}3\ mA$, $D5$ deneyi için $I_{SC} = 22{,}6\ mA$ ve $D7$ deneyi için $I_{SC} = 15{,}5\ mA$ olarak elde edilmiştir. Buna göre, tek optik eleman kullanıldığı $D2$, $D5$ ve $D7$ konfigürasyonlarında, kısa devre akımı için, optik eleman kullanılmadığı $D0$ referans duruma kıyasla sırası ile yaklaşık olarak $\%\,646$, $\%\,731$ ve $\%\,470$ oranında artış meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3.1b). Burada, düşük güneş ışınım şiddeti $G = 500\ W/m^2$ için PV hücrenin I_{SC} kısa devre akımında meydana gelen artışın $G = 1000\ W/m^2$'ye göre daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde güç, akım ve gerilimin bir fonksiyonu olduğu için, güç - gerilim $(P - V)$ karakteristik eğrilerinin akım - gerilim $(I - V)$ karakteristiği ile benzer davranış sergiledikleri görülmektedir. Buna göre $G = 500\ W/m^2$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddetleri altında CPV sistemin maksimum P_{max} çıkış gücü, $D0$ konfigürasyonu için sırası ile $1{,}78\ mW$ ve $6{,}15\ mW$, $D2$ konfigürasyonu için $15{,}97\ mW$ ve $46{,}89\ mW$, $D5$ konfigürasyonu için $17{,}88\ mW$ ve $52{,}53\ mW$ ve $D7$ konfigürasyonu için ise $12{,}27\ mW$ ve $35{,}66\ mW$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.1).

Şekil 3.1'den açıkça gözlendiği üzere, $G = 500\ W/m^2$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti değerleri altında $I - V$ ve $P - V$ karakteristik eğrileri benzer davranış sergiledikleri için bundan sonraki alt başlıklarda sonuçlar yalnızca $G = 1000\ W/m^2$ ışınım şiddeti için sunulacaktır.



Şekil 3.1: Tek optik eleman kullanımının CPV sistem karakteristikleri üzerindeki etkisi: (a) G=500 W/m^2, (b) G=1000 W/m^2.

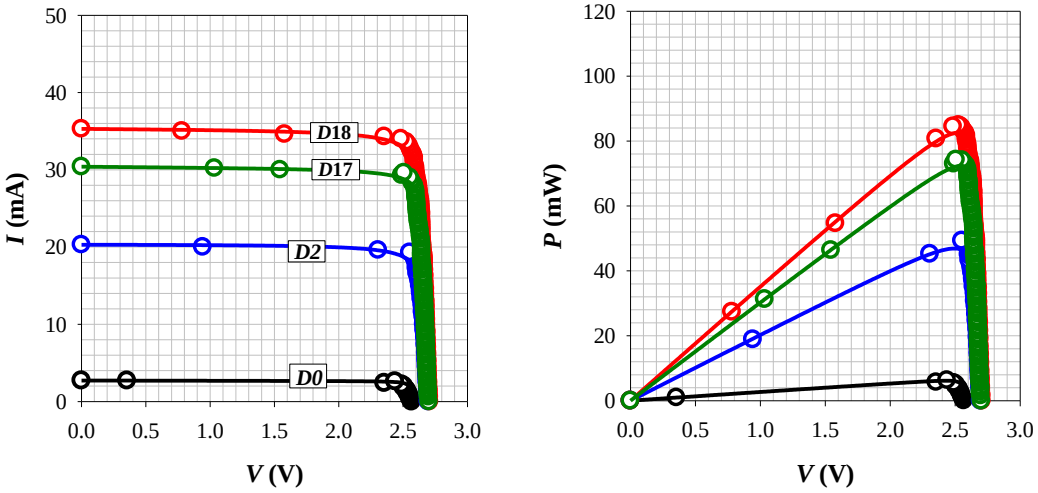
3.1.2 İkincil optik eleman kullanımının etkisi

İkincil optik eleman kullanımının CPV sistem performansını nasıl etkilediğini görmek amacıyla, tek optik eleman olarak $F-150-100$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan $D2$ konfigürasyonuna farklı (f sayısı, yoğunlaşma oranı gibi) optik özelliklere sahip ikincil optik elemanlar eklenerek $G = 1000\,W/m^2$ güneş ışınım şiddeti için $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.2a-c). Öncelikle, ikincil optik elemanın f sayısının etkisini gözlemlemek üzere, aynı $C_2 = 78{,}5$ yoğunlaşma oranlarına ve farklı f sayılarına ($f_2 = 0{,}9$ ve $0{,}7$) sahip iki ayrı Fresnel lensin ikincil optik eleman olarak kullanıldığı sırası ile $D17$ ($F-150-100\,x\;F-100-90$) ve $D18$ ($F-150-100\,x\,F-100-70$) konfigürasyanları için $L_D = 80\,mm$'de ölçümler alınmıştır (Şekil 3.2a). Şekil 3.2a'dan açıkça görüldüğü gibi, ikincil optik eleman kullanımı, CPV sistemin $I-V$ ve $P-V$ karakteristiklerini, f_2 ikincil optik elemanın f sayısına bağlı olarak önemli ölçüde değiştirmekte olduğu ve f_2 azaldıkça CPV sistem performansının daha da arttığı görülmektedir. İkincil optik eleman kullanımıyla V_{OC} açık devre geriliminde dikkate değer bir değişim görülmezken, CPV sistemin I_{SC} kısa devre akımında ve P_{max} maksimum güç değerlerinde belirgin bir artış göze çarpmaktadır. Buna göre, $C_2 = 78{,}5$ ve $f_2 = 0{,}9$ optik özellikli ikincil optik elemanın kullanıldığı $D17$ ve $C_2 = 78{,}5$ ve $f_2 = 0{,}7$ optik özellikli ikincil optik eleman kullanılan $D18$ konfigürasyonlarında $L_D = 80\,mm$ için yapılan ölçümlerde, kısa devre akımı I_{SC} sırasıyla $30{,}4\,mA$ ve $35{,}3\,mA$; maksimum güç P_{max} ise sırasıyla $72{,}33\,mW$ ve $82{,}53\,mW$ olarak tespit edilmiştir. Bu durum, $D17$ ve $D18$ konfigürasyonlarından elde edilen I_{SC} (P_{max}) değerlerinin $D2$ konfigürasyonuna göre sırasıyla % 50 (% 54) ve % 75 (% 76) daha yüksek olduğunu göstermektedir. Daha sonra, $f_2 = 0{,}7$ ve $C_2 = 21{,}2$ optik özellikli ikincil optik elemanın kullanıldığı $D20$ konfigürasyonu için yine $L_D = 80\,mm$'de ölçümler alınmıştır (Şekil 3.2b). $D20$ konfigürasyonu, aynı f_2 sayısına sahip $D18$ ile karşılaştırıldığında, düşük C_2 değerli ikincil optik eleman kullanımının CPV sistem performansını daha da iyileştirdiğini Şekil 3.2b'den gözlemlemek mümkündür. Diğer bir ifadeyle, C_2 ikincil optik elemanın yoğunlaşma oranının değişimi CPV sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. $D20$ konfigürasyonu için lensler arasındaki mesafe $80\,mm$'de alınan ölçümlerde I_{SC} (P_{max}) değerlerinin $D2$ ve $D18$ konfigürasyonlarına kıyasla sırası ile

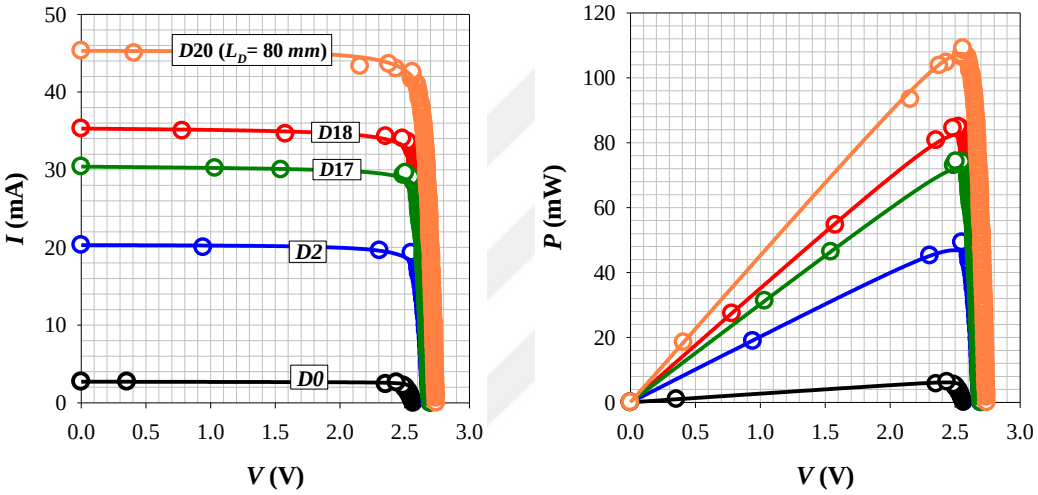
$\%\,123$ ($\%\,129$) ve $\%\,28{,}3$ ($\%\,30$) artışla $45{,}3\,mA$ ($107{,}43\,mW$) olduğu belirlenmiştir.

Son olarak, $f_2 = 0{,}7$ ve $C_2 = 21{,}2$ optik özelliklere sahip ikincil optik eleman kullanılan $D20$ konfigürasyonu için lensler arası mesafe değiştirilerek $L_D = 70\,mm$'de ölçümler alınmış ve CPV sistem $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.2c). Şekil 3.2c, lensler arası mesafe değişiminin CPV sistem karakteristiklerini olumsuz yönde etkilediğini ve CPV sistemin, diğer ikincil optik eleman kullanılan konfigürasyonlara (yani D17, D18 ve $D20_{L_D=80mm}$) kıyasla, daha kötü bir performans sergileyerek tek optik eleman kullanılan $D2$ konfigürasyonuna yakın bir karakteristik gösterdiğini yansıtmaktadır. D20 konfigürasyonunda $L_D = 70\,mm$ için I_{SC} ve P_{max} değerleri $L_D = 80\,mm$'ye göre sırası ile $\%\,50{,}33$ ve $\%\,50$ azalarak $22{,}5\,mA$ ve $53{,}53\,mW$ olarak ölçülmüştür.

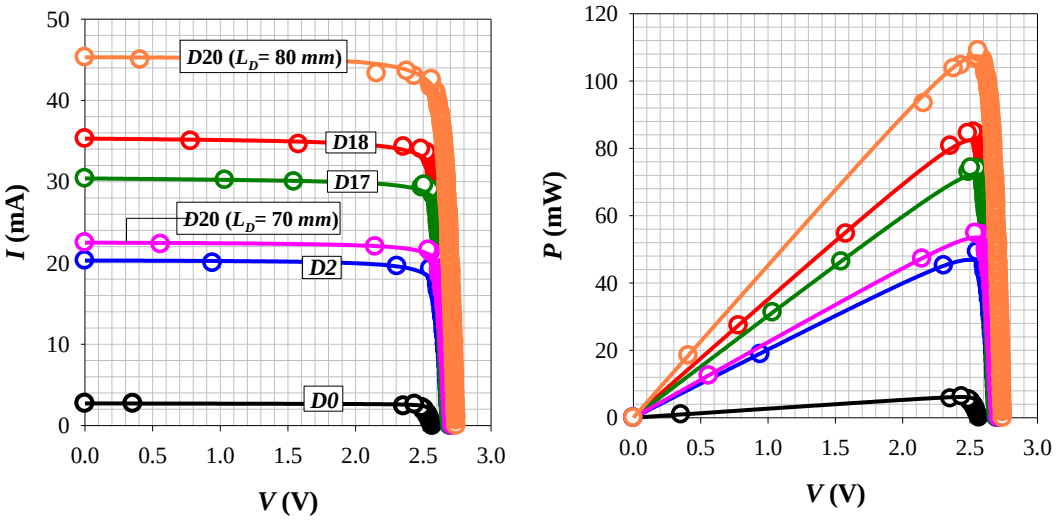
Özetle Şekil 3.2a-c, ikincil optik eleman kullanılarak PV hücre üzerindeki güneş ışınım yoğunluğunu artırmak ve buna bağlı olarak da CPV sistem performansını tek optik elemanlı sistemlere kıyasla önemli ölçüde iyileştirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Ancak, ikincil optik eleman kullanılan CPV sistemlerde, sistem performansı önemli ölçüde C_2 ikincil optik eleman yoğunlaşma oranına, f_2 ikincil optik eleman f sayısına ve lensler arası mesafeye bağlı olduğunu tekrar vurgulamak gerekir. Çift optik eleman kullanılan CPV sistemlerde ikincil optik elemanın C_2 ve f_2 gibi optik özellikler ile lensler arası mesafenin uygun tayin edilmesi sistem performansı açısından son derece önem arz etmektedir. Eğer ilgili parametreler uygun tayin edilmez ise ikincil bir optik eleman kullanmanın CPV sistem üzerinde herhangi bir olumlu etki meydana getirmeyeceğini söylemek mümkündür. Bu yüzden, ikincil optik elemanın yoğunlaşma oranı, f sayısı ve lensler arası mesafenin CPV sistem performansı üzerindeki bağıl etkileri alt başlıklar altında detaylı olarak irdelenecektir.



(a)



(b)

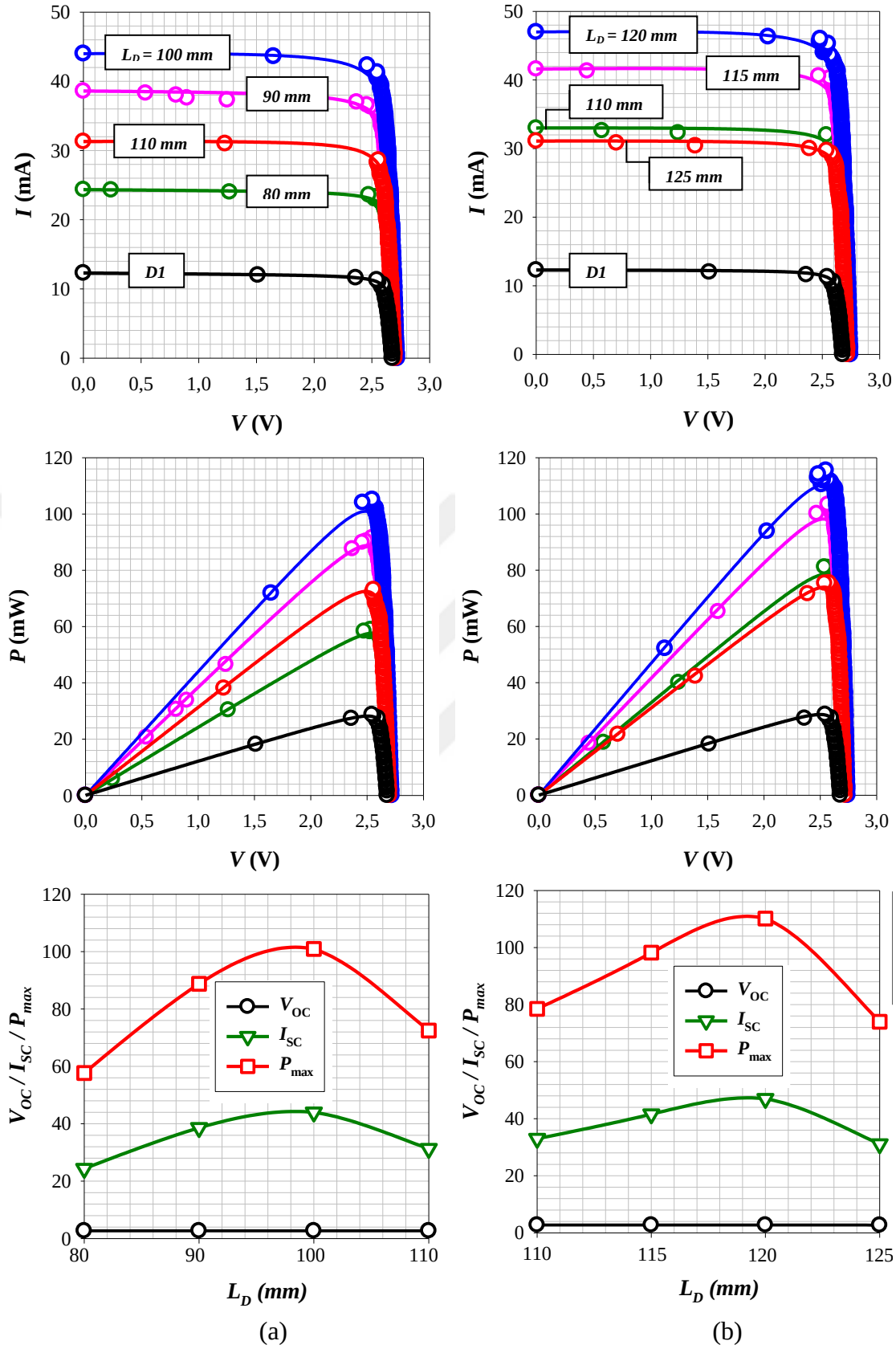


(c)

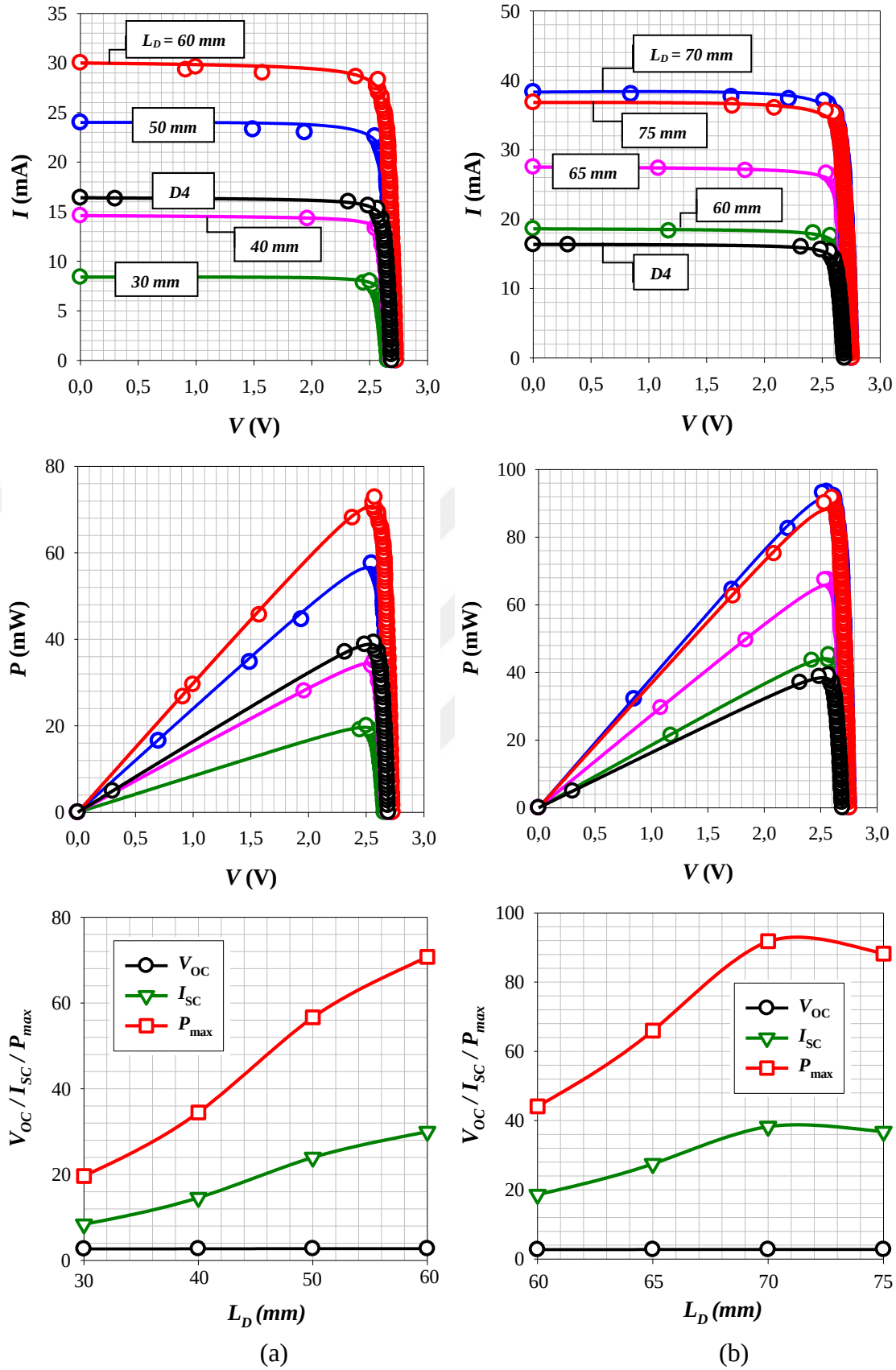
Şekil 3.2: Çift optik eleman kullanımının CPV sistem karakteristikleri üzerindeki etkisi (G=1000 W/m^2 için).

3.2 Lensler Arasındaki Mesafenin Etkisi

İkincil optik eleman kullanılan $D9 - D33$ konfigürasyonları için farklı lensler arası mesafe (L_D) değerlerinde ölçümler alınmış ve $I - V$, $P - V$ karakteristik eğrileri ile performans parametreleri tek optik elemanlı CPV sistemle karşılaştırılarak, L_D'nin çift optik eleman kullanılan CPV sistemlerin performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 3.3'te $F-150-140\,x\,F-100-70$ ve $F-150-140\,x\,F-52-35$ optik eleman çiftlerinden oluşan sırası ile $D12$ ve $D14$ konfigürasyonlarına ait sonuçlar verilmiştir. Buna göre, her iki konfigürasyon için de, L_D mesafesi artışının belirli bir kritik değere kadar CPV sistem performansını iyileştirdiği ancak lensler arası mesafe kritik değerin üzerine çıktığında CPV sistem performansının kötüleşmeye başladığını ifade etmek mümkündür. $D12$ ve $D14$ konfigürasyonları için en yüksek performansın elde edildiği L_D mesafeleri sırası ile $100\,mm$ ve $120\,mm$ olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, L_D mesafesi değişiminin PV hücrenin V_{OC} değerini etkilemediği, buna karşın en yüksek I_{SC} ve P_{max} değerlerinin sırası ile 44 mA ($47\,mA$) ve $100{,}92\,mW$ ($110{,}17\,mW$) olarak $L_D = 100\,mm$ ($L_D = 120\,mm$)'de ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu değerler, tek optik elemanlı $D1$ konfigürasyonu ile kıyaslandığında, I_{SC} ve P_{max} için sırası ile yaklaşık olarak $\%\,260$ ($\%\,285$) ve $\%\,257$ ($\%\,289$)'luk artışı işaret etmektedir. Şekil 3.4'te ise, $F-100-90\,x\,F-100-70$ ve $F-100-90\,x\,F-52-35$ optik özellikli Fresnel lens çiftlerinden oluşan sırası ile $D25$ ve $D27$ konfigürasyonları için farklı L_D mesafelerinde alınan ölçümler sonucunda elde edilen CPV sistem karakteristik eğrileri ve performans parametreleri sunulmuştur. $D12$ ve $D14$ konfigürasyonlarına benzer şekilde $D27$ konfigürasyonu için de L_D mesafesi ile CPV sistem performans parametreleri arasında monoton olmayan bir ilişki gözlenmektedir. Başka bir ifadeyle, belirli bir L_D mesafesine kadar L_D artışı ile CPV sistem performansı iyileşmekte ancak L_D kritik değerin üzerine çıktığında sistem performansı kötüleşme eğilimi sergilemektedir. $D27$ konfigürasyonu için maksimum güç ve kısa devre akımı değerleri sırası ile $I_{SC} = 38{,}3\,mA$ ve $P_{max} = 91{,}81\,mW$ ile $L_D = 70\,mm$ için elde edildiği ve $L_D > 70\,mm$ için sistem performans parametrelerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. $D25$ konfigürasyonu için L_D'nin artışı ile sistem performansının arttığı ancak düşük L_D mesafelerinde ($L_D < 50\,mm$) CPV sistem performansının tek optik elemanlı CPV sistem performansının altında kaldığı göze çarpmaktadır.



Şekil 3.3: L_D mesafesinin (a) D12, (b) D14 konfigürasyonları üzerindeki etkisi (G=1000 W/m^2 için).

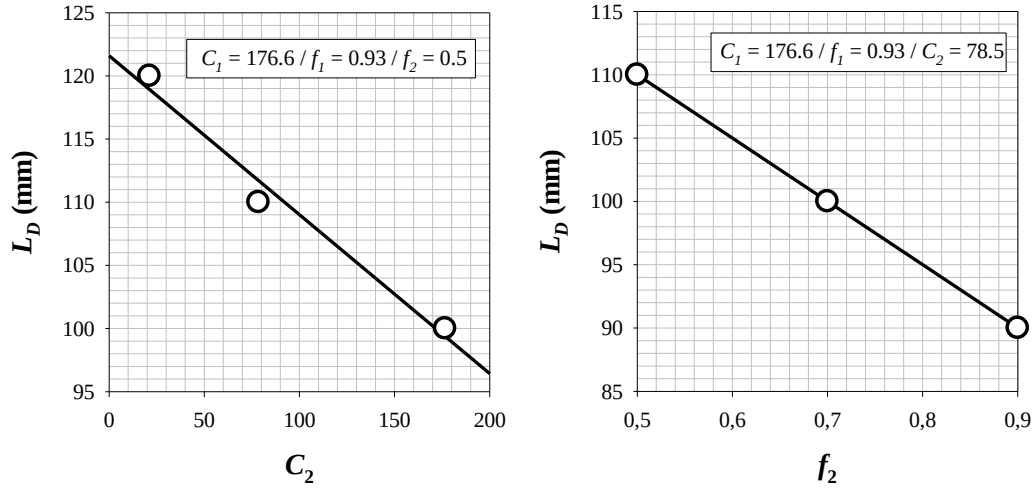


(a) (b)

Şekil 3.4: L_D mesafesinin (a) D25, (b) D27 konfigürasyonları üzerindeki etkisi (G =1000 W/m^2 için).

Şunu vurgulamak gerekir ki, çalışma kapsamında göz önüne alınan diğer çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarında da maksimum gücün ortaya çıktığı kritik L_D mesafesinden sonra L_D artışı ile sistem performansının azalma eğilimde olduğu görülmüştür. Ayrıca, çift optik elemanlı CPV sistemlerin performanslarının, lensler arası mesafe uygun olarak ayarlanmaz ise tek optik elemanlı CPV sistemlerin altında kaldığı gözlenmiştir.

Çizelge 3.1'de, bu çalışma kapsamında dikkate alınan, çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarında kullanılan Fresnel lens çiftlerinin optik özellikleri, maksimum CPV sistem performansının elde edildiği lensler arası mesafe ve çift optik elemanlı CPV sistemden elde edilen maksimum güç değerleri (tek optik elemanlı CPV sistemler ile karşılaştırılarak) sunulmuştur. Maksimum CPV sistem performansının ortaya çıktığı L_D mesafesi değerinin Fresnel lens çiftlerinin optik özelliklerine bağlı olarak değiştiği göze çarpmaktadır. Ayrıca, ikincil optik elemanın yoğunlaşma oranı ve f sayısı gibi optik özelliklerinin maksimum gücün ortaya çıktığı lensler arası mesafe değerini önemli ölçüde etkilediğini de gözlemlemek mümkündür. Bu durumu, birincil optik eleman olarak $C_1 = 176{,}6$ ve $f_1 = 0{,}9$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan CPV sistemlerde ikincil optik elemanın yoğunlaşma oranı (C_2) ve f sayısı (f_2) ile maksimum gücün elde edildiği L_D mesafesinin değişiminin verildiği Şekil 3.5'ten daha açık bir şekilde görmek mümkündür. Şekil 3.5, çift optik elemanlı CPV sistemlerde f_2 (C_2) sabit tutulup C_2 (f_2) artırıldığında, maksimum güç elde edebilmek için L_D mesafesinin azaltılması gerektiğini işaret etmektedir.



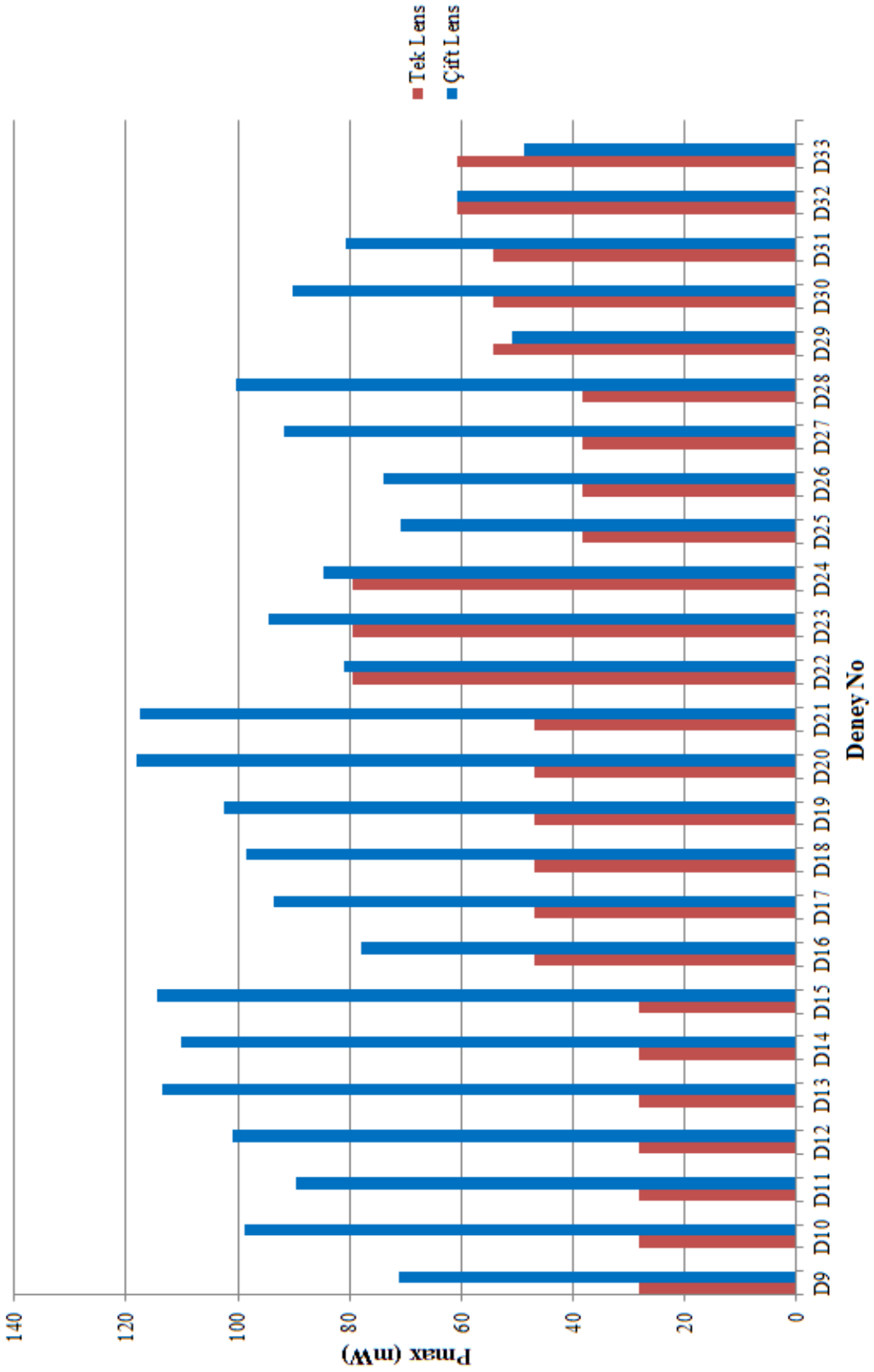
Şekil 3.5: İkincil optik elemanın yoğunlaşma oranı (C_2) ve *f* sayısı (f_2) ile maksimum gücün elde edildiği L_D mesafesinin değişimi (G=1000 W/m^2).

Çizelge 3.1: Çift optik Elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının optik özellikleri, L_{Dmax} ve P_{max} değerleri.

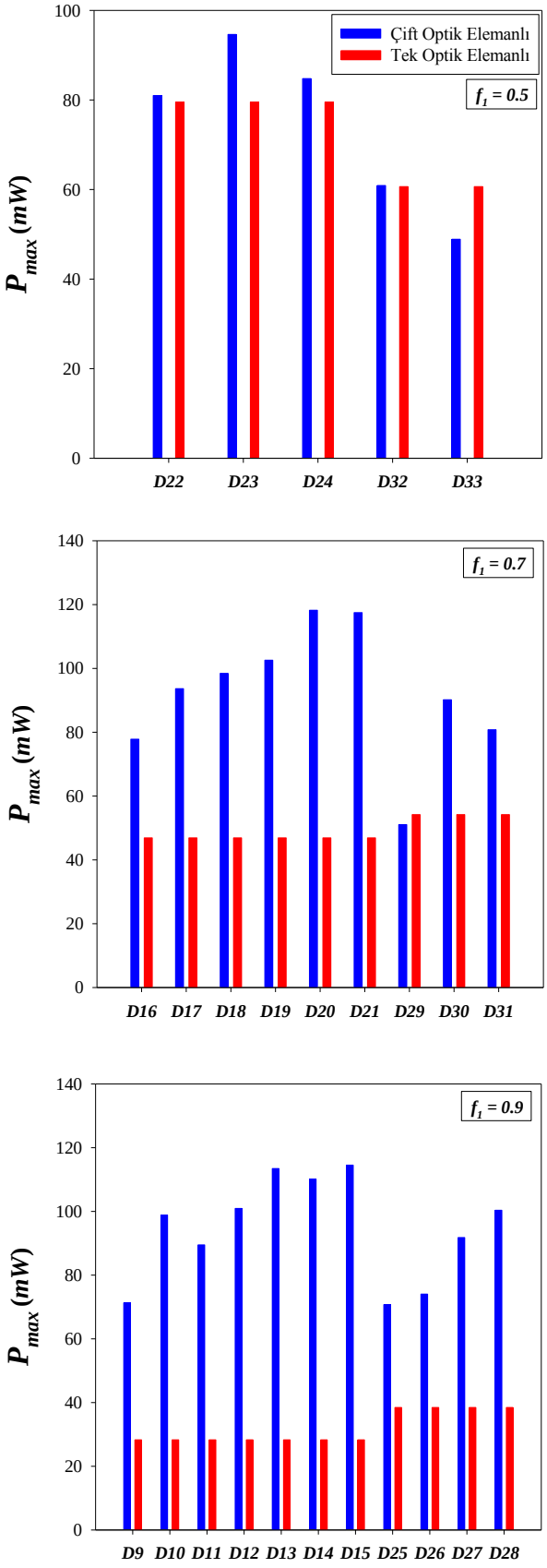
Deney No	Ø1 (mm)	FL1 (mm)	Ø2 (mm)	FL2 (mm)	C1	C2	f1	f2	LD (mm)	Pmax (mW) (Çift Lens)	Pmax (mW) (Tek Lens)
D9	150	140	150	100	176,71	176,71	0,9	0,7	80	71,31	28,30
D10	150	140	150	70	176,71	176,71	0,9	0,5	100	98,85	28,30
D11	150	140	100	90	176,71	78,54	0,9	0,9	90	89,47	28,30
D12	150	140	100	70	176,71	78,54	0,9	0,7	100	100,92	28,30
D13	150	140	100	50	176,71	78,54	0,9	0,5	110	113,45	28,30
D14	150	140	52	35	176,71	21,24	0,9	0,7	120	110,17	28,30
D15	150	140	52	25	176,71	21,24	0,9	0,5	120	114,52	28,30
D16	150	100	150	70	176,71	176,71	0,7	0,5	70	77,84	46,89
D17	150	100	100	90	176,71	78,54	0,7	0,9	70	93,63	46,89
D18	150	100	100	70	176,71	78,54	0,7	0,7	70	98,44	46,89
D19	150	100	100	50	176,71	78,54	0,7	0,5	80	102,58	46,89
D20	150	100	52	35	176,71	21,24	0,7	0,7	85	118,22	46,89
D21	150	100	52	25	176,71	21,24	0,7	0,5	85	117,47	46,89
D22	150	70	100	50	176,71	78,54	0,5	0,5	50	80,98	79,53
D23	150	70	52	35	176,71	21,24	0,5	0,7	55	94,62	79,53
D24	150	70	52	25	176,71	21,24	0,5	0,5	55	84,76	79,53
D25	100	90	100	70	78,54	78,54	0,9	0,7	60	70,74	38,44
D26	100	90	100	50	78,54	78,54	0,9	0,5	70	74,03	38,44
D27	100	90	52	35	78,54	21,24	0,9	0,7	70	91,81	38,44
D28	100	90	52	25	78,54	21,24	0,9	0,5	75	100,37	38,44
D29	100	70	100	50	78,54	78,54	0,7	0,5	40	51,06	54,19
D30	100	70	52	35	78,54	21,24	0,7	0,7	55	90,18	54,19
D31	100	70	52	25	78,54	21,24	0,7	0,5	55	80,78	54,19
D32	100	50	52	35	78,54	21,24	0,5	0,7	35	60,88	60,65
D33	100	50	52	25	78,54	21,24	0,5	0,5	35	48,90	60,65

Şekil 3.6'da, $G = 1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti altında, çift optik eleman kullanılan farklı CPV sistem konfigürasyonlarından elde edilen maksimum güç çıktısı P_{max} değerleri, tek optik elemanlı durumlar ile karşılaştırılarak verilmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde çift lens kullanımının sistem performansını çok büyük oranda olumlu yönde etkilediği görülmektedir. En yüksek güç çıktısının $118{,}22\ mW$ ile $F-150-100\ x\ F-52-35$ Fresnel lens çiftinden oluşan $D20$ konfigürasyonundan elde edildiği ve $F-150-100$ optik özellikli tek Fresnel lensin kullanıldığı $D2$ konfigürasyonuna kıyasla $\%\,152$ güç artışı sağlandığı görülmüştür. En yüksek performans artışı yaklaşık $\%\,305$ ile, $F-150-140$ optik özellikli tek Fresnel lens kullanılan CPV sisteme $F-52-35$ optik özellikli ikincil bir Fresnel lens eklenerek oluşturulan $D15$ $(F-150-140\ \times F-52-35)$ konfigürasyonu için elde edilmiştir. Diğer taraftan, $F-100-70\ x\ F-100-50$ lens çiftli $D29$ ve $F-100-50\ x\ F-52-25$ lens çiftli $D33$ nolu CPV sistem konfigürasyonları için ikincil optik eleman kullanımının CPV sistem performansını olumsuz etkilediği, $F-150-70\ x\ F-\ 100-50$ lens çiftli $D22$ ve $F-100-50\ x\ F-52-35$ lens çiftli $D32$ nolu CPV sistem konfigürasyonlarında ise sistem performansı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Bunun yanı sıra, Şekil 3.6 incelendiğinde, genel olarak yüksek birincil optik eleman yoğunlaşma oranına sahip CPV sistemlerden daha fazla güç çıkışı elde edildiği göze çarpmaktadır. Ayrıca, yüksek f_1 değerine sahip çift optik elemanlı CPV sistemlerin genel itibari ile tek optik elemanlı CPV sistemlere kıyasla yüksek performans sergilediği, buna karşın düşük f_1 değerine sahip çift optik elemanlı sistemlerde ise çıkış gücünün tek optik elemanlı sistemlerle mukayese edilebilir ya da daha düşük seviyelerde kaldığı dikkatleri çekmektedir. Bu durum, birincil optik elemanın f sayısına göre çift ve tek optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının güç çıktılarının karşılaştırıldığı Şekil 3.7'den daha açık bir şekilde gözlemlenebilir. Buna göre, Şekil 3.7 tek Fresnel lensli bir CPV sistem, ikincil bir Fresnel lens ile desteklenerek performans artışı sağlanması isteniyor ise birincil optik eleman için $f_1 > 0{,}5$ koşulu sağlanması gerektiğini işaret etmektedir. Diğer bir ifadeyle, tek optik elemanlı bir CPV sistem için $f_1 \leq 0{,}5$ olması durumunda ikincil bir optik eleman kullanılmasının güç çıktısının üzerinde olumlu bir etkisinin bulunmadığını söylemek mümkündür.



Şekil 3.6: Tek ve çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonları P_{max} değerleri (G=1000 W/m^2 için).



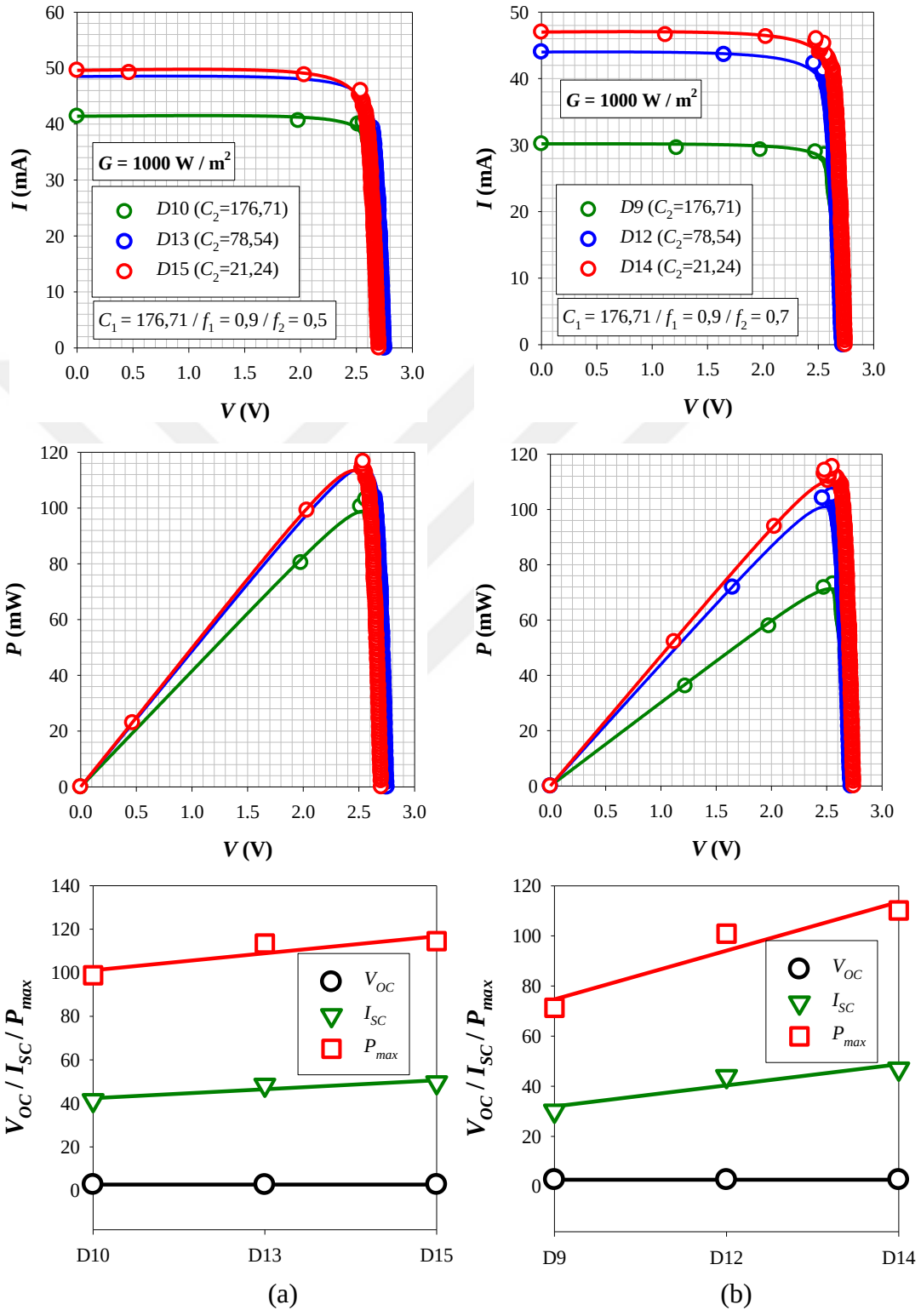
Şekil 3.7: Birincil optik elemanın *f* sayısına göre çift ve tek optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının güç çıktılarının karşılaştırılması (G=1000 W/m^2 için).

3.3 İkincil Optik Elemanın Yoğunlaşma Oranının Etkisi

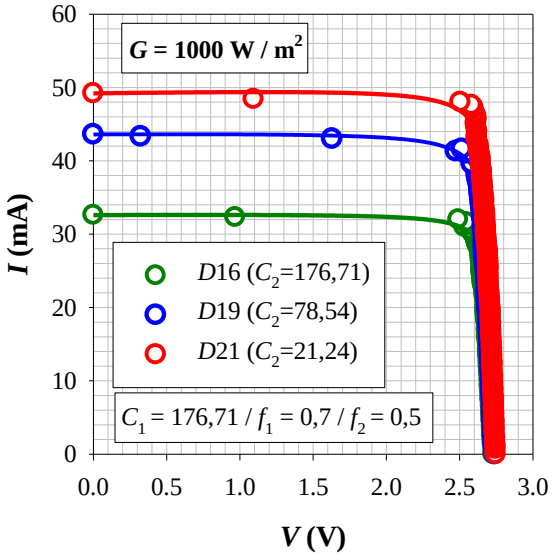
Çift optik elemanlı CPV sistemlerde ikincil optik eleman yoğunlaşma oranının CPV sistem performansı üzerindeki etkisini daha iyi görmek amacıyla, aynı birincil optik elemanlar ile farklı yoğunlaşma oranlarına sahip ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan CPV sistem konfigürasyonlarına ait $I-V$, $P-V$ karakteristik eğrileri ve performans parametreleri $G = 1000\,W/m^2$ için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da karşılaştırılmıştır.

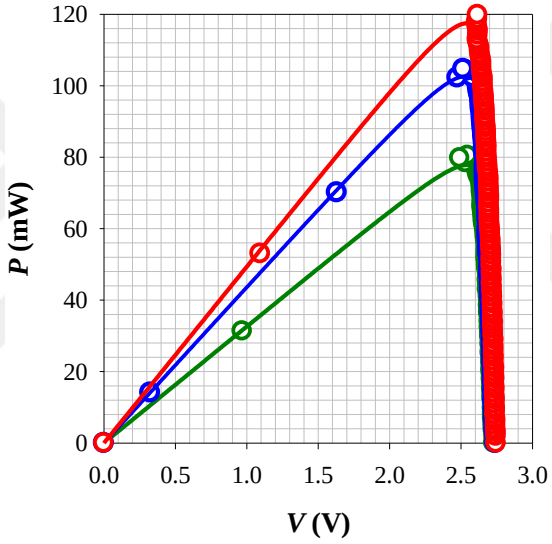
Şekil 3.8a'da, $F-150-140$ optik özellikli birincil optik eleman ile $f_2 \cong 0{,}5$ değerlerine sahip $F-150-70$, $F-100-50$ ve $F-52-25$ optik özellikli ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan sırası ile $D10$, $D13$ ve $D15$ konfigürasyonları; Şekil 3.8b'de ise yine aynı birincil optik eleman ile $f_2 \cong 0{,}7$ değerine sahip $F-150-100$, $F-100-70$ ve $F-52-35$ optik özellikli ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan sırası ile $D9$, $D12$ ve $D14$ konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Buna göre, C_2 azaldıkça CPV sistem performansının iyileştiğini gözlemlemek mümkündür. Ayrıca bu durumun, özellikle ikincil optik elemanın f sayısı arttıkça, çok daha belirgin olduğu da göze çarpmaktadır (Şekil 3.8b). Örneğin, ikincil optik eleman olarak $f_2 = 0{,}7$ $(f_2 = 0{,}5)$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan CPV sistem konfigürasyonları içerisinde, $C_2 = 176{,}71$ olan $D9$ $(D10)$ konfigürasyonu için $P_{max} = 71{,}31\,mW$ $(P_{max} = 98{,}85\,mW)$; $C_2 = 21{,}24$ olan $D14$ $(D15)$ konfigürasyonu için ise maksimum çıkış gücü yaklaşık $\%\,55$ $(\%\,16)$ artış ile $P_{max} = 110{,}17\,mW$ $(P_{max} = 114{,}52\,mW)$ olarak elde edilmiştir. Şekil 3.9'da ise daha düşük f_1 $(\cong 0{,}7)$ değerine sahip olan $F-150-100$ optik özellikli Fresnel lens ile $f_2 \cong 0{,}5$ değerlerine sahip $F-150-70$, $F-100-50$ ve $F-52-25$ optik özellikli Fresnel lens çiftlerinden oluşan sırası ile $D16$, $D19$ ve $D21$ konfigürasyonlarına ait sonuçlar verilmiştir. Benzer şekilde, C_2 azaldığında CPV sistem performansında önemli bir iyileşme meydana geldiği gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 3.8a ve Şekil 3.9 karşılaştırıldığında, düşük f_1 değerine sahip çift optik elemanlı CPV sistemlerde, C_2'nin azalmasıyla CPV sistem performansında meydana gelen iyileşmenin yaklaşık $\%\,51$ ile çok daha yüksek oranda olduğunu vurgulamak gerekir.

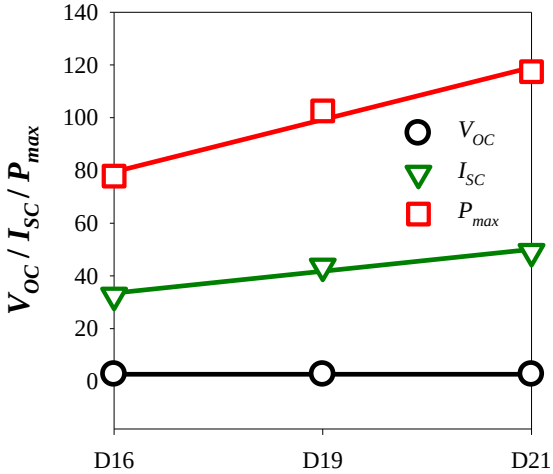
Özetle, Şekil 3.8 ve 3.9'daki bulgular, C_2 azaldığında CPV sistem performansının iyileştiğini ve bu durumun özellikle düşük f_1 ya da yüksek f_2 değerlerine sahip çift optik elemanlı CPV sistemlerde çok daha belirgin olduğunu yansıtmaktadır.



Şekil 3.8: *f1*= 0,9 değerinde yoğunlaşma oranının CPV sistem performansına olan etkisi: (a) *f2*=0,5 ve (b) *f2*=0,7 için.



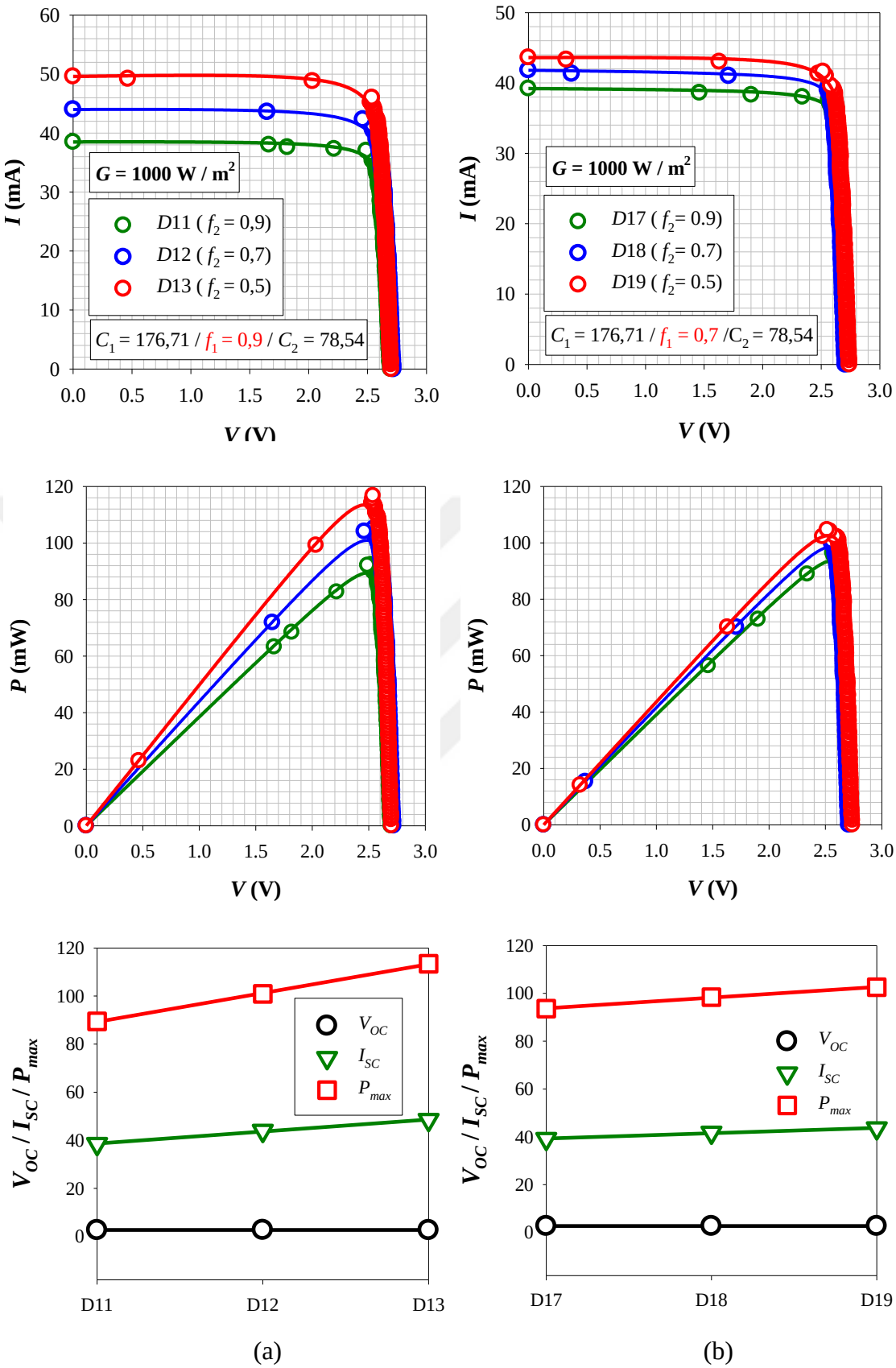




Şekil 3.9: *f1*=0,7 ve *f2*=0,5 için yoğunlaşma oranının CPV sistem performansına olan etkisi.

3.4 İkincil Optik Elemanın f Sayısının Etkisi

İkincil optik elemanın f sayısının CPV sistem performansı üzerindeki etkilerini daha detaylı gözlemleyebilmek için aynı birincil optik elemanlar ile farklı f_2 değerlerine sahip ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan çift optik elemanlı CPV sistem konfigürasyonlarının performanslarının karşılaştırıldığı Şekil 3.10'u incelemek yararlı olacaktır. Şekil 3.10a'da, $F-150-140$ optik özellikli birincil optik eleman ile farklı f_2 değerlerine sahip $F-100-90$, $F-100-70$ ve $F-100-50$ optik özellikli ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan sırası ile $D11$, $D12$ ve $D13$ konfigürasyonları; Şekil 3.10b'de ise $F-150-100$ birincil optik eleman ile yine farklı f_2 değerlerine sahip $F-100-90$, $F-100-70$ ve $F-100-50$ optik özellikli ikincil optik eleman çiftlerinden oluşan sırası ile $D17$, $D18$ ve $D19$ konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.10a ve 3.10b incelendiğinde, f_2 değeri azaldığında çift optik elemanlı CPV sistem performansının iyileştiği gözlenmektedir. Buna göre, birincil optik eleman olarak $f_1 = 0{,}9$ optik özellikli Fresnel lens kullanılan CPV sistem konfigürasyonları içerisinde, $f_2 = 0{,}9$ olan $D11$ konfigürasyonu için $P_{max} = 89{,}47\,mW$ ($I_{SC} = 38{,}5\,mA$); $f_2 = 0{,}5$ olan $D13$ konfigürasyonu için ise maksimum çıkış gücü (kısa devre akımı) yaklaşık % 27 (% 26) artış ile $P_{max} = 113{,}45\,mW$ ($I_{SC} = 48{,}5\,mA$) olarak belirlenmiştir (Şekil 3.10a). Diğer taraftan, daha düşük $f_1 (= 0{,}7)$ değerli birincil optik eleman kullanılan CPV sistem konfigürasyonları arasında, $f_2 = 0{,}9$ olan $D17$ konfigürasyonu için $P_{max} = 93{,}63\,mW$ ($I_{SC} = 39{,}20\,mA$); $f_2 = 0{,}5$ olan $D19$ konfigürasyonu için ise maksimum çıkış gücü (kısa devre akımı) yaklaşık % 9,5 (% 11,2) artış ile $P_{max} = 102{,}58\,mW$ (I_{SC} = 43,6 mA) olarak elde edilmiştir (Şekil 3.10b). Bu durum, yüksek f_1 değerli birincil optik eleman kullanılan çift Fresnel lensli CPV sistemlerde, ikincil Fresnel lensin f sayısı f_2'nin azalmasıyla sistem performansında meydana gelen iyileşmenin çok daha belirgin olduğunu yansıtmaktadır.



Şekil 3.10: Farklı *f2* değerlerinin CPV sistem performansına olan etkisi: (a) *f1*=0,9 ve (b) *f1*=0,7 için.

3.5 Varyans Analizi (ANOVA)

Bu bölümde, birincil ve ikincil optik elemanlara ait yoğunlaşma oranı ve f sayısı gibi optik özelliklerin, çift optik elemanlı CPV sistemlerin performansları üzerindeki bağıl ya da ağırlıklı etkilerini ortaya koymak amacıyla istatistiki çalışmalar gerçekleştirilecektir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki ağırlıklı etkilerini ortaya koymak amacıyla kullanılan en yaygın istatistiksel yaklaşımların başında Varyans Analizi ya da kısa adıyla ANOVA yöntemi gelmektedir. Esasen ANOVA yöntemi, hedef fonksiyonu üzerindeki etkili her bir faktörün (ya da parametrenin) oransal etkisini ortaya koyarak, faktörlerin (ya da parametrelerin) hedef fonksiyonu üzerindeki önem sırasını öngörmek amacıyla uygulanır [75,76]. ANOVA yönteminde veri setine ait serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (SS), kareler ortalaması (MS), F değeri ve etki oranları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır (Denklem 3.1 - 3.4).

$$F_{faktör} = \frac{V_{faktör}}{V_{hata}} \tag{3.1}$$

$$V_{faktör} = \frac{SS_{faktör}}{SD_{faktör}} \tag{3.2}$$

$$SD_{faktör} = k - 1 \tag{3.3}$$

$$SS_{faktör} = \frac{\sum {\beta_{faktör,i}}^2}{N} - \frac{(\sum \beta_i)^2}{n} \tag{3.4}$$

Burada $F_{faktör}$ ilgili parametrenin hedef fonksiyonuna etki oranını temsil etmekte olup, daha büyük $F_{faktör}$ değeri ilgili parametre için daha büyük etki oranı anlamına gelmektedir. $V_{faktör}$ ve V_{hata} ise sırasıyla faktörün ve hatanın varyans değerini ifade etmektedir. $SD_{faktör}$ faktörün serbestlik derecesini, $SS_{faktör}$ faktöre bağlı kareler toplamını, $\beta_{faktör,i}$ i. seviyedeki faktörün S/N (sinyal-gürültü) oranlarının toplamını, N her bir seviyedeki faktörün tekrar sayısını, n toplam test veya analiz sayısını göstermektedir. MS ise her bir parametrenin SS değerinin, her bir parametrenin serbestlik derecesine oranı şeklinde hesaplanır.

Hedef fonksiyonun değerleri S/N (sinyal-gürültü) oranına, "En Büyük-En İyi" performans karakteristiği göz önüne alınarak aşağıdaki bağıntı yardımı ile dönüştürülmüştür (Denklem 3.5).

$$S/N = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} {y_i}^{-2}\right) \tag{3.5}$$

Burada, n test veya deney sayısını, y_i i. performans karakteristiği için elde edilen sonuç değerini temsil etmektedir. Bu çalışma için y_i değeri her bir deney için elde edilen P_{max} maksimum güç çıktısı, P_{max} / $P_{max,TOE}$ çift ve tek optik elemanlı CPV sistem maksimum çıkış gücü oranları veya L_D lensler arası mesafe değerini göstermektedir.

Birincil ve ikincil optik elemanlara ait optik özelliklerin; maksimum çıkış gücü, çift ve tek optik elemanlı CPV sistemlerin maksimum çıkış gücü oranları ve lensler arası mesafe üzerindeki ağırlıklı etkileri gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilecek ANOVA analizi için seçilen parametreler ve seviyeler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Buna göre çalışma kapsamında iki seviyeye sahip bir parametre (C_1: Birincil optik elemanın yoğunlaşma oranı) ve üç seviyeye sahip üç parametre (f_1: Birincil optik eleman f sayısı, C_2: İkincil optik eleman yoğunlaşma oranı, f_2: İkincil optik eleman f sayısı) göz önüne alınmıştır.

Çizelge 3.2: ANOVA analizi için seçilen parametre ve seviyeler.

Parametreler	**Seviyeler**		
$\boldsymbol{C_1}$	78,54	176,71	-
$\boldsymbol{f_1}$	0,5	0,7	0,9
$\boldsymbol{C_2}$	21,24	78,54	176,71
$\boldsymbol{f_2}$	0,5	0,7	0,9

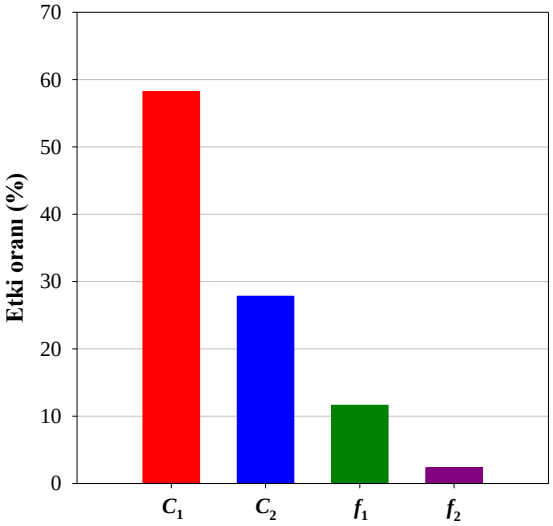
Optik özelliklerin, öngörülen seviyelerine bağlı olarak, çift optik elemanlı CPV sistemlerin P_{max} maksimum çıkış gücü üzerindeki ağırlıklı etkileri ANOVA yöntemi ile analiz edilmiş olup, Çizelge 3.3 ve 3.4'te sırası ile veri seti ve analiz sonuçları sunulmuştur. Ayrıca optik özelliklerin P_{max} üzerindeki etki oranları yüzdesel olarak Şekil 3.11'de karşılaştırılmıştır. Buna göre, C_1, birincil optik eleman yoğunlaşma oranı $\%\,58{,}23$ ile P_{max}, maksimum çıkış gücü üzerindeki en etkili optik parametre olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, P_{max} üzerinde etki oranı en düşük optik parametre ise $\%\,2{,}34$ ile f_2 olduğu göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, P_{max} üzerinde C_1'in ardından önemli ölçüde etki sahibi olan diğer optik özellikler ise sırası ile C_2 $(\%\,27{,}82)$ ve f_1 $(\%\,11{,}62)$ olduğu tespit edilmiştir. Esasen, optik özelliklerin P_{max} üzerindeki ağırlıklı etkileri ile ilgili Çizelge 3.4 ve Şekil 3.11'de sunulan ANOVA analizine ait çıktılar beklenen sonuçlardır. Zira, yüksek yoğunlaşma oranına sahip bir CPV sistemden her zaman daha yüksek güç çıktısı elde edilmesi beklenir.

Çizelge 3.3: ANOVA analizi için P_{max} değerleri ve S/N oranları çizelgesi.

Sıra No	Deney No	Parametreler				P_{max} (mW)	S/N
		C_1	C_2	f_1	f_2		
1	30	78,54	21,24	0,7	0,7	90,18	39,10
2	31	78,54	21,24	0,7	0,5	80,78	38,15
3	28	78,54	21,24	0,9	0,5	100,37	40,03
4	27	78,54	21,24	0,9	0,7	91,81	39,26
5	26	78,54	78,54	0,9	0,5	74,03	37,39
6	25	78,54	78,54	0,9	0,7	70,74	36,99
7	23	176,71	21,24	0,5	0,7	94,62	39,52
8	24	176,71	21,24	0,5	0,5	84,76	38,56
9	20	176,71	21,24	0,7	0,7	118,22	41,45
10	21	176,71	21,24	0,7	0,5	117,47	41,40
11	19	176,71	78,54	0,7	0,5	102,58	40,22
12	18	176,71	78,54	0,7	0,7	98,44	39,86
13	17	176,71	78,54	0,7	0,9	93,63	39,43
14	16	176,71	176,71	0,7	0,5	77,84	37,82
15	15	176,71	21,24	0,9	0,5	114,52	41,18
16	13	176,71	78,54	0,9	0,5	113,45	41,10
17	14	176,71	21,24	0,9	0,7	110,17	40,84
18	12	176,71	78,54	0,9	0,7	100,92	40,08
19	10	176,71	176,71	0,9	0,5	98,85	39,90
20	11	176,71	78,54	0,9	0,9	89,47	39,03
21	9	176,71	176,71	0,9	0,7	71,31	37,06

Çizelge 3.4: P_{max} için ANOVA analiz çıktıları.

Parametre	SD	SS	MS	F	Etki Oranı (%)
C_1	1	21,03	21,03	34,89	58,23
C_2	2	20,10	10,05	16,67	27,82
f_1	2	8,39	4,20	6,96	11,62
f_2	2	1,68	0,84	1,40	2,34
Hata	13	7,84	0,60		
Σ	20	38,59			



Şekil 3.11: Optik özelliklerin P_{max} üzerindeki yüzdesel etki oranları.

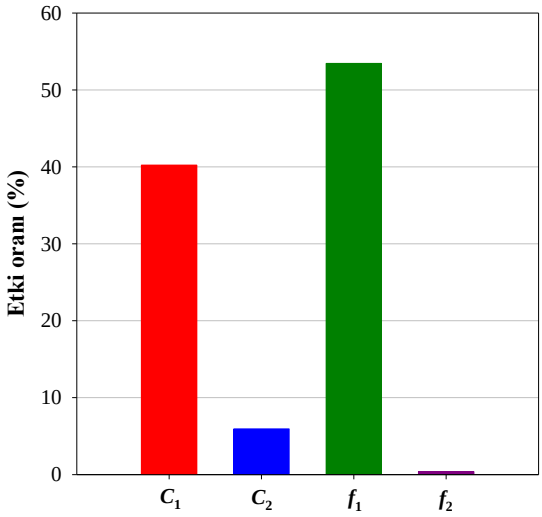
Bu yüzden optik özelliklerin, çift optik elemanlı CPV sistemlerin performans artışı üzerindeki ağırlıklı etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek için, çift ve tek optik elemanlı CPV sistem maksimum çıkış gücü oranını ($E_a = P_{max} \,/\, P_{max,TOE}$) dikkate almak yararlı olacaktır (Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Şekil 3.12). Şekil 3.12, tek optik elemanlı bir CPV sistemin ikincil optik eleman ile desteklenmesi sonucu sağlanan performans artışının çok büyük ölçüde birincil optik eleman optik özelliklerine bağlı olduğunu ve ikincil optik eleman f sayısının ise herhangi bir etkisinin bulunmadığını yansıtmaktadır. ANOVA analiz sonuçlarına göre, $P_{max} \,/\, P_{max,TOE}$ oranı üzerindeki en etkili optik parametrenin $\%\,69{,}71$ ile f_1 olduğu tespit edilmiştir. Şunu da vurgulamak gerekir ki, Şekil 3.12'deki sonuçlar, daha önce Şekil 3.7'de sunulan sonuçlar ile uyumlu olup, tek optik elemanlı bir CPV sistem için $f_1 \leq 0{,}5$ olması durumunda ikincil bir optik eleman kullanılmasının performans üzerinde olumlu bir etkisinin bulunmadığına dair bulguyu destekler niteliktedir.

Çizelge 3.5: ANOVA analizi için P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ değerleri ve S/N oranları çizelgesi.

Sıra No	Deney No	Parametreler				E_a	S/N
		C_1	C_2	f_1	f_2		
1	30	78,54	21,24	0,7	0,7	1,66	4,42
2	31	78,54	21,24	0,7	0,5	1,49	3,47
3	28	78,54	21,24	0,9	0,5	2,61	8,34
4	27	78,54	21,24	0,9	0,7	2,39	7,56
5	26	78,54	78,54	0,9	0,5	1,93	5,69
6	25	78,54	78,54	0,9	0,7	1,84	5,30
7	23	176,71	21,24	0,5	0,7	1,19	1,51
8	24	176,71	21,24	0,5	0,5	1,07	0,55
9	20	176,71	21,24	0,7	0,7	2,52	8,03
10	21	176,71	21,24	0,7	0,5	2,51	7,98
11	19	176,71	78,54	0,7	0,5	2,19	6,80
12	18	176,71	78,54	0,7	0,7	2,10	6,44
13	17	176,71	78,54	0,7	0,9	2,00	6,01
14	16	176,71	176,71	0,7	0,5	1,66	4,40
15	15	176,71	21,24	0,9	0,5	4,05	12,14
16	13	176,71	78,54	0,9	0,5	4,01	12,06
17	14	176,71	21,24	0,9	0,7	3,89	11,81
18	12	176,71	78,54	0,9	0,7	3,57	11,04
19	10	176,71	176,71	0,9	0,5	3,49	10,86
20	11	176,71	78,54	0,9	0,9	3,16	10,00
21	9	176,71	176,71	0,9	0,7	2,52	8,03

Çizelge 3.6: P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ için ANOVA analiz çıktıları.

Parametre	SD	SS	MS	F	Etki Oranı (%)
C_1	1	71,80	71,80	107,31	26,60
C_2	2	21,23	10,61	15,86	3,51
f_1	2	190,78	95,39	142,57	69,71
f_2	2	1,36	0,68	1,01	0,18
Hata	13	8,70	0,67		
Σ	20	222,71			



Şekil 3.12: Optik özelliklerin P_{max} / $P_{(max,TOE)}$ üzerindeki yüzdesel etki oranları.

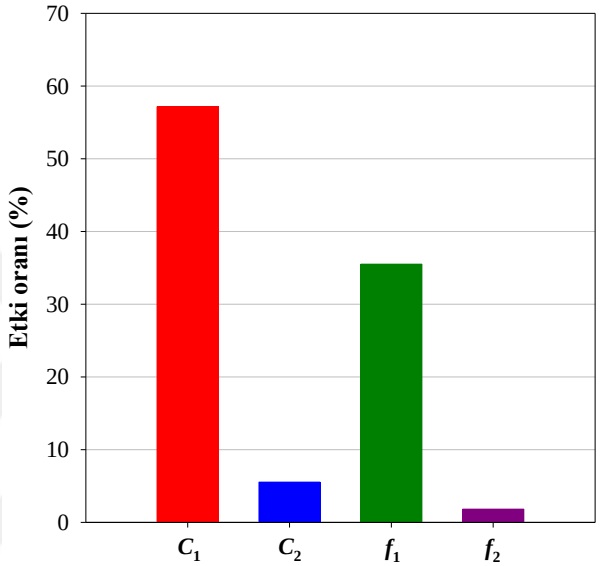
Son olarak, CPV sistem optik özelliklerinin, L_D üzerindeki etkileri Çizelge 3.7'deki veri seti kullanılarak ANOVA yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar Çizelge 3.8 ve Şekil 3.13'te sunulmuştur. Buna göre, istatistiki açıdan, L_D mesafesi üzerinde her iki optik eleman özellikleri de etkili olmakla birlikte, C_1 ve f_1'in L_D mesafesi üzerinde çok daha etkili olduğu görülmektedir. L_D mesafesi üzerindeki en etkili optik parametrenin % 57,15 ile C_1 olduğu, bunu % 35,5, % 5,53 ve % 1,81 ile sırasıyla f_1, C_2 ve f_2'nin takip ettiği tespit edilmiştir. Özetle, ANOVA analiz sonuçları, çift Fresnel lensli CPV sistem performansı üzerinde ağırlıklı olarak birincil optik eleman özellikleri C_1 ve f_1'in etkin olduğunu, ikincil optik eleman f sayısı f_2'nin ise en az etkiye sahip optik parametre olduğunu işaret etmektedir. Ayrıca ikincil optik eleman açısından bakıldığında, önceki bulgularla (Bölüm 3.3 ve 3.4 bkz.) uyumlu olarak, C değerinin f sayısına göre, çift Fresnel lensli CPV sistem performansı üzerinde daha etkili olduğunu yansıtmaktadır.

Çizelge 3.7: ANOVA analizi için L_D değerleri ve *S/N* oranları çizelgesi.

Sıra No	Deney No	Parametreler				L_D (mm)	S/N
		C_1	C_2	f_1	f_2		
1	30	78,54	21,24	0,7	0,7	55	34,81
2	31	78,54	21,24	0,7	0,5	55	34,81
3	28	78,54	21,24	0,9	0,5	75	37,50
4	27	78,54	21,24	0,9	0,7	70	36,90
5	26	78,54	78,54	0,9	0,5	70	36,90
6	25	78,54	78,54	0,9	0,7	60	35,56
7	23	176,71	21,24	0,5	0,7	55	34,81
8	24	176,71	21,24	0,5	0,5	55	34,81
9	20	176,71	21,24	0,7	0,7	85	38,59
10	21	176,71	21,24	0,7	0,5	85	38,59
11	19	176,71	78,54	0,7	0,5	80	38,06
12	18	176,71	78,54	0,7	0,7	70	36,90
13	17	176,71	78,54	0,7	0,9	70	36,90
14	16	176,71	176,71	0,7	0,5	70	36,90
15	15	176,71	21,24	0,9	0,5	120	41,58
16	13	176,71	78,54	0,9	0,5	110	40,83
17	14	176,71	21,24	0,9	0,7	120	41,58
18	12	176,71	78,54	0,9	0,7	100	40,00
19	10	176,71	176,71	0,9	0,5	100	40,00
20	11	176,71	78,54	0,9	0,9	90	39,08
21	9	176,71	176,71	0,9	0,7	80	38,06

Çizelge 3.8: L_D için ANOVA analiz çıktıları.

Parametre	SD	SS	MS	F	Etki Oranı (%)
C_1	1	53,48	53,48	282,84	57,15
C_2	2	10,35	5,18	27,37	5,53
f_1	2	66,45	33,22	175,71	35,50
f_2	2	3,39	1,70	8,97	1,81
Hata	13	2,46	0,19		
Σ	20	95,44			



Şekil 3.13: Optik özelliklerin L_D üzerindeki yüzdesel etki oranları.

.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yoğunlaştırıcı optik eleman olarak nokta odaklı Fresnel lens kullanılan, çift optik elemanlı CPV sistemlerin performansları, $G = 500$ ve $1000\ W/m^2$ güneş ışınım şiddeti altında deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda farklı optik özelliklere sahip Fresnel lenslerden oluşan tek ve çift optik elemanlı 33 farklı CPV sistem konfigürasyonu göz önüne alınarak, birincil ve ikincil optik eleman yoğunlaşma oranları, f sayıları ve lensler arası mesafenin CPV sistem performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmıştır. Ayrıca Fresnel lens çiftlerine ait optik özelliklerin CPV sistem performansı üzerindeki ağırlıklı etkilerini görmek amacıyla, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler kullanılarak, ANOVA yöntemi ile istatistiki analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel ve istatistiki çalışmalar neticesinde ön plana çıkan sonuç ve ileriye dönük yapılabilecek çalışmalara yönelik önerileri aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlemek mümkündür.

- İkincil optik eleman kullanarak PV hücre üzerindeki güneş ışınım yoğunluğunu artırmak ve buna bağlı olarak da CPV sistem performansını, tek Fresnel lens uygulamalı sistemlere kıyasla önemli ölçüde iyileştirmek mümkündür.
- Çift Fresnel lens kullanılan CPV sistemlerde, ikincil Fresnel lensin optik özellikleri, yoğunlaşma oranı (C_2), f sayısı (f_2) ve lensler arası mesafeye (L_D) bağlı olarak sistem performansında önemli bir değişim sergilemektedir.
- Çift optik eleman kullanılan CPV sistemlerde ikincil optik elemanın C_2 ve f_2 gibi optik özellikleri ile L_D'nin uygun tayin edilmesi sistem performansı açısından son derece önem arz etmektedir. Eğer ilgili parametreler uygun tayin edilmez ise ikincil optik eleman kullanımı CPV sistem performansını olumlu etkilememektedir.
- Çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistem konfigürasyonlarında, maksimum gücün ortaya çıktığı kritik L_D mesafesinden sonra lensler arası mesafenin artışı ile sistem performansının azalma eğilimde olduğu görülmüştür.

- Maksimum CPV sistem performansının ortaya çıktığı L_D mesafesinin Fresnel lens çiftlerinin optik özelliklerine bağlı olarak değişim gösterdiği, buna göre f_2 (C_2) sabit tutulup C_2 (f_2) artırıldığında, maksimum güç elde edebilmek için L_D mesafesinin azaltılması gerektiği gözlenmiştir.
- Yüksek C_1 değerine sahip çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistem konfigürasyonlarının daha yüksek güç çıkışı sağladığı tespit edilmiştir.
- Yüksek f_1 değerine sahip çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemler, tek Fresnel lensli uygulamalara kıyasla daha yüksek performans sergilemektedir.
- İkincil bir Fresnel lens kullanarak CPV sistemin performansının iyileştirilmesi isteniyor ise $f_1 > 0{,}5$ olması gerektiği gözlenmiştir.
- ANOVA analizleri neticesinde, çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemlerin performansı üzerinde ağırlıklı olarak birincil optik eleman özellikleri C_1 ve f_1'in etkin olduğu, ikincil optik eleman f sayısı f_2'nin ise en az etkiye sahip optik parametre olduğu tespit edilmiştir.
- İkincil Frensel lensin optik özellikleri açısından, C_2 yoğunlaşma oranının f sayısı f_2'ye göre CPV sistem performansı üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür.
- Genel olarak, Fresnel lens çiftlerine ait optik özelliklerin CPV sistem performansı üzerindeki etki oranı sıralamasının $C_1 > f_1 > C_2 > f_2$ şeklinde olduğunu söylemek mümkündür.
- Çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemlerde maksimum çıkış gücünün elde edildiği lensler arası mesafe için Yapay Sinir Ağı gibi sezgisel yöntemler kullanılarak Fresnel lens çiflerinin optik özelliklerine bağlı matematiksel modeller oluşturulabilir.
- Oluşturulacak matematiksel modeller kullanılarak çift Fresnel lens uygulamalı CPV sistemler için iyileştirme çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü (2017). Erişim: 7 Temmuz 2020, https://enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_15/files/downloads/Sayi_15.pdf

[2] Ültanır, M.Ö. (1996). 21. Yüzyılın Eşiğinde Güneş Enerjisi, *Bilim ve Teknik, 340*, 50-55.

[3] Varınca, K.B. & Varank, G. (2005). Güneş Kaynaklı Farklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Kıyaslanması ve Çözüm Önerileri, *Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, (ss.148-160). Mersin: Haziran 24-25.

[4] Kapluhan, E. (2014). Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Güneş Enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu, *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, *29*, 70-98.

[5] Johnson, G. (2009). Plugging into The Sun, *National Geographic*, Erişim: 7 Temmuz 2020, https://www.nationalgeographic.com/magazine/2009/09/solar/

[6] Wasfi, M. (2011). Solar Energy and Photovoltaic Systems, *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Renewable and Sustainable Energy (JRSE)*, February Edition.

[7] BP Statistical Review of World Energy (2019). Erişim: 7 Temmuz 2020, https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf

[8] Kavaz, İ. (2019). Yerli ve Milli Enerji Politikaları Ekseninde Kömür, Ankara: Seta.

[9] Kalogirou, S.A. (2019). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Erişim adresi http://1.droppdf.com/files/AvIdq/solar-energy-engineering-processes-and-systems-2nd-ed-2014-.pdf (Orijinal eser 2014'te basıldı).

[10] Şen, Z. (2004). Solar Energy in Progress and Future Research Trends, *Progr. Energy Combust. Sci., 30,* 367–416, doi:10.1016/j.pecs.2004.02.004.

[11] Şen, Z. (2019). Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy. Erişim adresi https://books.google.com.tr/books?id=244OdSz4dNQC&pg=PA223&lpg=PA223&dq=zekai+%C5%9Fen+solar+energy+cite&source=bl&o

ts=Nm9QR3KaeJ&sig=ACfU3U3crBxHXmK9lDNrQV_NsoC0fL4qQw&hl=tr&sa=X&ved=2ahUKEwj3mb2cgNPlAhUCwMQBHfkfDrYQ6AEwB3oECAkQAQ#v=onepage&q&f=false (Orijinal eser 2008'de basıldı).

[12] Tawfik, M., Tonnellier, Sansom, X., C. (2018). Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90* (2018), 802-813.

[13] Masters, G.M. (2019). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, http://www.a-ghadimi.com/files/Courses/Renewable%20Energy/REN_Book.pdf (Orijinal eser 2004'te basıldı).

[14] Özen, Y. (2015). *III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi*, (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[15] Kılıç, F.Ç. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makina, 56* (671), 28-40.

[16] Topçu, C. ve Yünsel, D.T. (2012). Yenilenebilir Enerji (Rapor No. 2012 / 03). Adana: Çukurova Kalkınma Ajansı.

[17] International Energy Agency (2011). *Solar Energy Perspectives*, Erişim adresi http://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/SolarPowerForAfrica/SolarEnergyPerspectives6111251e.pdf

[18] Cook, G., Billman, L., Adcock, R. (2019). Photovoltaic Fundamentals. Erişim adresi https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf (Orijinal eser 1995'te basıldı).

[19] Chikate, B.V. ve Sadawarte, Y.A. (t.y.). The Factors Affecting the Performance of Solar Cell, 4th *International Conference on Quality Up-gradation in Engineering, Science and Technology (ICQUEST2015), (ss.4-8). Wardha:* B.D.C.O.E., Ekim 2015.

[20] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE (2020). *Photovoltaics Report*. Erişim adresi https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf

[21] Güneş Enerjisi (t.y.). Erişim: 7 Temmuz 2020, https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/pv.html

[22] Soga, T. (2006). *Güneş Enerjisi Dönüşümü için Nanoyapıdaki Materyaller* (Kılıç, B., Çev.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

[23] University of California, Berkeley, EECS Instructional and Electronics Support (2006). *EE143 Semiconductor Tutorial*. Erişim adresi http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/sp06/lectures/Semiconductor_tutorial.pdf

[24] Cüce, E. (2009). *Farklı İşletme Koşullarında Fotovoltaik Modüllerin Performans Parametrelerinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[25] Goswami, D.Y. (2019). Principles of Solar Engineering, Erişim adresi https://www.advan-kt.com/principlesofsolarengi.pdf (Orijinal eser 2015'te basıldı).

[26] University of Colorado, Electrical, Computer and Energy Engineering (2011). *Semiconductor Fundamentals*. Erişim adresi https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2_3.htm

[27] Elektronik Ders Notları 2 (t.y.). Erişim: 7 Temmuz 2020, https://docplayer.biz.tr/21200014-Elektronik-ders-notlari-2.html

[28] Öztürk, H.H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir: Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi, Ekim 18-21.

[29] Goswami D.Y., Kreith F. (2008). *Energy Conversion*. Boca Raton: CRC Press.

[30] Stathis Michaelides E.E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Berlin: Springer-Verlag.

[31] Al, E.B. (2010). *Fotovoltaik Pillerin Yapısı ve Akım İletim Mekanizması* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[32] Ruivo da Silva, J.E.S. (2014). *Células Fotovoltaicas Estado da Arte e Perspetivas Futuras* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/6192/1/3490_7066.pdf

[33] Messenger, R.A. ve Ventre, J. (2019). Photovoltaic Systems Engineering, Erişim.adresi.https://www.google.com/search?q=Messenger%2C+R.A.+ve+Ventre%2C+J.&rlz=1C1SAVO_enTR675TR675&oq=Messenger%2C+R.A.+ve+Ventre%2C+J.+&aqs=chrome..69i57.1431j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (Orijinal eser 2004'te basıldı).

[34] Markvart, T. ve Castañer, L. (2003). *Practical Handbook of Photovoltaics-Fundamentals and Applications.*

[35] Dinçer, F. & Meral, M.E. (2010). Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells, Scientific Research, *Smart Grid and Renewable Energy, 1* (1), 47-50, doi: 10.4236/sgre.2010.11007

[36] Pukhrem, S. (2013). A Photovoltaic Panel Model in Matlab/Simulink, 20-23, doi: 10.13140/RG.2.1.2628.4645

[37] Solar Cell Parameters and Equivalent Circuit (t.y.). Erişim: 7 Temmuz 2020, https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_9_1_9_3.pdf

[38] Rech, B., Bett, A.W., Brabec, C.J., Neuhaus, D.H. (2016). Photovoltaik - Technologiesteckbrief zur Analyse "Flexibilitäskonzepte für die Stromversorgung 2050". Berlin: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech-Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.

[39] Antonini, P. (2013). Concentrated Photovoltaics (CPV): Is it a real opportunity?, *EPJ Web of Conferences*, *54*, 1-12, doi: 10.1051/epjconf/20135401015.

[40] Khamooshi, M., Salati, H., Egelioglu, F., Faghiri, A.H., Tarabishi, J., ve Babadi, S. (2014). A Review of Solar Photovoltaic Concentrators, *International Journal of Photoenergy*, *2014*, 1-17, doi: http://dx.doi.org/10.1155/2014/958521.

[41] Xie, W.T., Dai, Y.J., Wang, R.Z., Sumathy, K. (2010). Concentrated Solar Energy Applications Using Fresnel Lenses: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier*, *15* (6), 2588-2606.

[42] Best Research – Cell Efficiencies (t.y.) Erişim: 10.Haziran.2020**,** https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200406.pdf

[43] Sierra, C. & Vàsquez, A. J. (2005). High Solar Energy Concentration with a Fresnel Lens, *Journal of Materials Science*, *40* (6), 1339-1343.

[44] The University of Toledo, Department of Physics and Astronomy (2013). *Photovoltaics Under Concentrated Sunlight*. Erişim adresi http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/teach/archives/4400.2013/20130402_PHYS4400_Lecture_17%20-%20Concentrator%20Photovoltaics.pdf

[45] Tien, N.X. & Shin, S. (2016). A Novel Concentrator Photovoltaic (CPV) System with the Improvement of Irradiance Uniformity and the Capturing of Diffuse Solar Radiation, *Applied Sciences*, *6* (9), 251-265, doi:10.3390/app6090251.

[46] Buljan, M., Lopes, J.M., Benítez, P., Miñano, J.C. (2014). Recent trends in concentrated photovoltaics concentrators' architecture, *Journal of Photonics for Energy*,.*4*.(1), 1-14, doi: 10.1117/1.JPE.4.040995.

[47] IEC 62108 International Standard, (2016). Cenevre, İsviçre: IEC.

[48] Giannuzzi, A. (2014). *Enhancing The Efficiency of Solar Concentrators by Controlled Optical Aberrations* (Doktora Tezi). Erişim adresi https://core.ac.uk/download/pdf/20259712.pdf

[49] Leutz, R., Suzuki, A., Akisawa, A., Kashiwagi, T. (1999). Design of a Nonimaging Fresnel Lens for Solar Concentrators, *Solar Energy*, *65* (6), 379-387.

[50] Oshida, I. (1961). Step Lenses and Step Prisms for Utilization of Solar Energy, *New Sources of Energy, Proceedings of the Conference*, (ss. 598–603), Roma: 1961.

[51] Harmon, S. (1977). Solar-Optical Analyses of a Mass-Produced Plastic Circular Fresnel Lens, *Solar Energy*, *19* (1), 105-108, doi: 10.1016/0038-092X(77)90096-2.

[52] James, L.W. & Williams, J.K. (1978). Fresnel Optics for Solar Concentration on Photovoltaic Cells, *Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (ss. 673–679). Washington D.C.: Haziran 5-8.

[53] Nakata, Y., Shibuya, N., Kobe, T., Okamoto, K., Suzuki, A., Tsuji, T. (1980). Performance of Circular Fresnel Lens Photovoltaic Concentrator, *Japanese Journal of Applied Physics, 19* (2), 75-78.

[54] Shepard, N.F. & Chan, T.S. (1981). The Design and Performance of a Point-Focus Concentrator Module, *Proceedings of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (ss. 336-341), Orlando, Florida: 1981.

[55] Jebens, R.W. (1989). U.S. Patent No. 4,799,778, USA.

[56] Akhmedov, K., Zakhidov, R.A., Klychev, S.I. (1991). Optical and Energy Characteristics of Round Fresnel Lenses with Flat Bands, *Applied Solar Energy*, *27* (1), 43-46.

[57] Soluyanov, A.A. & Grilikhes, V.A. (1993). A Method for Designing Fresnel Lenses as Solar Radiation Concentrators, *Applied Solar Energy, 29* (5), 57-62.

[58] Grilikhes, V.A., Rumyantsev, V.D., Shvarts, M.Z. (1996). Indoor and Outdoor Testing of Space Concentrator AlGaAs/GaAs Photovoltaic Modules with Fresnel Lenses, *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,* (ss. 345-348). Washington D.C., USA.

[59] Rumyantsev, V.D., Chosta, O.I,. Grilikhes, V.A., Sadchikov, N.A., Soluyanov, A.A., Shvarts M.Z. (2002). Terrestrial and Space Concentrator PV Modules with Composite (Glass-Silicone) Fresnel Lenses, *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (ss. 1596–1599). New Orleans, Louisiana, USA.

[60] Kemmoku, Y., Sakakibara, T., Hiramatsu, M., Miyazaki, Y., Egami, T. (2003). Field Test of a Concentrator Photovoltaic System with Flat Fresnel, *Proceeding of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, (ss. 2379-2382). Osaka, Japonya.

[61] Whitfield, G.R., Bentley, R.W., Weatherby, C.K., Hunt, A.C., Mohring, H.D., Klotz, F.H. (1999). The Development and Testing of Small Concentrating PV System, *Solar Energy*, *67*, 23-34.

[62] Segev, G. & Kribus, A. (1982). Performance of CPV Modules Based on Vertical Multi-Junction Cells Under Non-Uniform Illumination, *Solar Energy, 88*, 120-128.

[63] Moffat, A.L. & Scharlack, R.S. (1982). The Design and Development of a High Concentration and High Efficiency Photovoltaic Concentrator Utilizing a Curved Fresnel Lens, *Proceedings of the 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (ss. 601-606). San Diego, California, USA.

[64] Huang, Q., Liao, T., Xu, L. (2018). Design and Preliminary Experiments of Truncated Ball Lens as Secondary Optical Element for CPV system, *Solar Energy, 169,* 19-23. doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.014.

[65] El Himer, S., Ahaitouf, A., El-Yahyaoui, S., Mechaqrane, A., Ouagazzaden, A. (2012). A Comparative of Four Secondary Optical

Elements for CPV Systems, *14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-14)*, (ss. 1-7). Puertollano, İspanya: Nisan 16-18.

[66] Victoria, M., Dominguez, C., Antion, I., Sala, G. (2009). Comparative Analysis of Different Secondary Optical Elements for Aspheric Primary Lenses, *Optics Express, 17* (8), 6488-6492.

[67] Chen, Y.C. & Chiang, H.W. (2015). Design of The Secondary Optical Elements for Concentrated Photovoltaic Units with Fresnel Lenses, *Applied Sciences 5*, 770-786. doi:10.3390/app5040770.

[68] Chen, Y.C. & Su, C.H. (2010). Concentrator Design of a Fresnel Lens and a Secondary Optical Element, *6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV- 6), 1277* (1), (ss. 109-112). Freiburg: Nisan 7-9.

[69] Ferrer-Rodríguez, J.P., Baig, H., Riverola, A., Fernández, E.F., Chemisana, D., Almonacid, F., Mallick, T.K., Pérez-Higueras, P. (2017). Design and Characterization of Refractive Secondary Optical Elements for a Point-focus Fresnel Lens-based High CPV System, *13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-13)*, (ss. 1-6). Ontario-Kanada: Mayıs 1-3.

[70] Renzi, M., Cioccolanti, L., Barazza, G., Egidi, L., Comodi, G. (2017). Design and Experimental Test of Refractive Secondary Optics on The Electrical Performance of a 3-Junction Cell Used in CPV Systems, *Applied Energy, 185* (P1), 233-243. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.064.

[71] El Himer, S., Ahaitouf, A., El-Yahyaou.i, S., Mechaqrane, A. (2017). Performance Analysis of Non-Imaging Fresnel Lens as a Primary Stage for CPV Units, *International Conference on Renewable Energies and Energy Efficiency (REEE '2017), 161* (1). Fes: Kasım 8-9.

[72] Şahin, F.E. & Yılmaz, M. (2019). High Concentration Photovoltaics (HCPV) with Diffractive Secondary Optical Elements, *Photonics, 6* (2), 68-76.

[73] Akbaba M. & Alattawi M.A.A. (1995). A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells, 37 (2),* 123-132.

[74] Pallant, J. (2016). *SPSS Survival Manual,* 6th edition. A&U Academic

[75] Canbolat, A.S., Bademlioğlu, A.H., Arslanoğlu, N., Kaynakli, O. (2019). Performance Optimization of Absorption Refrigeration Systems Using Taguchi, ANOVA and Grey Relational Analysis Methods, *Journal of Cleaner Production, 229,* 874-885.

[76] Canbolat, A.S. (2020). *Taşıt Radyatörlerinde Isıl Performans Optimizasyonunun Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi* (Doktora Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Ferhat KARTAL

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 18.11.1984 - Kdz. Ereğli

E-posta **:** f.kartal16@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2008, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Bursa İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, Makine Mühendisi, 2015-Devam
- EÜAŞ Tunçbilek Termik Santralı İşl. Müd., Kazan Bakım Mühendisi, 2011-2015

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- KARTAL, F., TURAN O. "Farklı Odaklanma Mesafesine Sahip CPV Sistemlerin Performanslarının İncelenmesi" **22. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK 2019).** 11-14 Eylül 2019, Kocaeli.